



中国机动车“减污降碳”目标、路径、效益分析与政策建议

Objectives, Pathway, Benefit Analysis and Policy Recommendations for Co- Management on Air Pollution & Carbon Reduction of Vehicles in China

生态环境部环境规划院

2023 年 9 月 15 日

Chinese Academy of Environmental Planning

September 15, 2023

关于作者

严 刚 生态环境部环境规划院 研究员
薛文博 生态环境部环境规划院 研究员
史旭荣 生态环境部环境规划院 助理研究员
王燕丽 生态环境部环境规划院 副研究员
雷 宇 生态环境部环境规划院 研究员
刘 鑫 生态环境部环境规划院 助理研究员
许艳玲 生态环境部环境规划院 副研究员

About the author

Gang Yan, Chinese Academy of Environmental Planning, Senior Fellow
Wenbo Xue, Chinese Academy of Environmental Planning, Senior Fellow
Xurong Shi, Chinese Academy of Environmental Planning, Assistant Fellow
Yanli Wang, Chinese Academy of Environmental Planning, Associate Fellow
Yu Lei, Chinese Academy of Environmental Planning, Senior Fellow
Xin Liu, Chinese Academy of Environmental Planning, Assistant Fellow
Yanling Xu, Chinese Academy of Environmental Planning, Associate Fellow

致谢

本研究由生态环境部环境规划院撰写，由能源基金会提供资金支持。

Acknowledgement

This report is a product of Chinese Academy of Environmental Planning and is funded by Energy Foundation China.

免责声明

若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。

凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.

The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

一、 研究背景与内容

1.1 研究背景

中国当前同时面临“美丽中国”建设与“碳达峰碳中和”双重挑战。全国生态环境保护大会强调要深入贯彻新时代中国特色社会主义思想，坚持以人民为中心，牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，把建设美丽中国摆在强国建设、民族复兴的突出位置，推动城乡人居环境明显改善、美丽中国建设取得显著成效。展望二〇三五年，广泛形成绿色生产生活方式，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，美丽中国建设目标基本实现。中国政府已明确提出力争在 2030 年前实现碳达峰，在 2060 年前实现碳中和。《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》进一步明确石油消费在“十五五”时期进入峰值平台期，陆路交通运输石油消费力争在 2030 年前达到峰值。与发达国家相比，中国实现“双碳目标”的时间更紧、难度更大。与此同时，中国还面临着实现 2035 年空气质量根本性改善的挑战。虽然自《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施以来，中国空气质量显著改善，2022 年全国 PM_{2.5} 年均值降至 29 微克/立方米，但仍是世界卫生组织指导值（WHO, 2021）的 5.8 倍，且远高于欧美日等主要发达经济体的 PM_{2.5} 浓度水平（美国、西欧各国和日本当前年均 PM_{2.5} 浓度在 8~15 微克/立方米之间）。与此同时，中国 O₃ 污染防治形势日益严峻，2022 年全国 O₃ 浓度相比 2015 年增长了 17.9%。

机动车是二氧化碳与大气污染物的共同排放大户，其零排放对我国实现 2030 年前“碳达峰”、2035 年“美丽中国”空气质量目标、2060 年前“碳中和”具有重要意义。2019 年我国交通二氧化碳（CO₂）排放量在全国能源活动 CO₂ 排放量中的占比超过 11%，其中公路排放约占总交通排放量的 85%，是交通领域最大的排放源。从污染物排放角度看，2020 年，全国机动车一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）和一次颗粒物（PM）排放量分别为 769.7 万吨、190.2 万吨、626.3 万吨和 6.8 万吨^[1]；其中，汽车是污染物排放总量的主要贡献者，汽车排放的 CO、HC、NO_x 和一次 PM 占比超过 90%^[1]。HC 和 NO_x 均是生成二次细颗粒物的重要前体物，一次 PM 也是细颗粒物的重要组成部分，因此移动源污

染已成为空气污染的重要来源，是造成我国大中城市细颗粒物污染的重要原因。以北京市为例，2020 年 PM_{2.5} 源解析结果表明，移动源对北京市 PM_{2.5} 浓度的贡献高达 46%^[2]。从人群健康角度来看，PM_{2.5}、NO₂ 和 CO 等污染物会对人体健康产生不利影响，为减轻相关疾病负担，WHO 于 2021 年修订了《全球空气质量指南》，加严了 PM_{2.5}、NO₂ 和 CO 等污染物指导值^[3]。由于道路交通周边通常人口较为密集，机动车污染物排放量大，且排放高度与人体高度相近，因此机动车污染排放将会给人体健康带来较大影响。因此，交通运输尤其是道路交通已成为推进减污降碳协同增效以及保护人群健康的重点领域^[4]。

亟需考虑不同区域和不同车型差异性，强有力推进道路交通零排放战略，以支撑实现“美丽中国”及“双碳”目标。美国千人汽车保有量约 800 辆，欧洲约 600 辆，2020 年中国仅约为 194 辆。虽然国情不同，中国不一定会复制欧美的高保有量，但是预计在经济发展的驱动下，中国机动车保有量在一段时间内还将保持增加，如果没有强有力的政策管控，将会带来更多的化石燃料消耗、二氧化碳和污染物排放，给气候变化应对、环境质量改善以及公众健康改善造成巨大压力。此外，中国不同地区经济发展极不平衡、冬季气温迥异、公共交通发展差距很大，机动车管控政策的宽松程度不同，都会影响未来机动车零排放路径。

本研究以“2030 年前碳达峰”和“2035 年美丽中国”等战略目标为约束，考虑“2060 年前碳中和”总体要求，探讨交通领域二氧化碳及各项污染物的减排需求。综合考虑不同区域差异性特征，分区域设计电动化、排放标准加严、节能措施、运输结构调整等机动车清洁政策措施发展路径。定量模拟 2020-2035 年不同机动车清洁路径下，全国及不同区域机动车二氧化碳及主要大气污染物的减排量、空气质量改善及其环境健康收益，并分解不同机动车清洁措施的贡献。此外，本研究也量化了不同机动车清洁路径实施后，机动车领域减排对实现“2035 年美丽中国”和“2030 年前碳达峰”目标的贡献。最后提出了 2020-2035 年区域差异化的机动车减污降碳路径与政策建议，助力推动中国机动车零排放进程。

1.2 研究内容

本项目主要包括 3 个研究任务，不同研究任务间的逻辑关系如下（图 1-1）。任务一侧重考虑“美丽中国 2035”及“碳达峰”两大战略目标，“自上而下”量

化两大战略目标驱动下的道路交通减排需求。任务二侧重考虑机动车清洁路径的技术可行性及区域差异性，“自下而上”从供给侧提出全国及不同分区机动车减污降碳路径。任务三用于量化模拟任务二提出的不同机动车清洁路径的碳污排放量、空气质量改善及环境健康效益。结合任务一、二研究成果，综合考虑机动车清洁路径的环境健康效益，提出推动机动车零排放进程的政策建议。

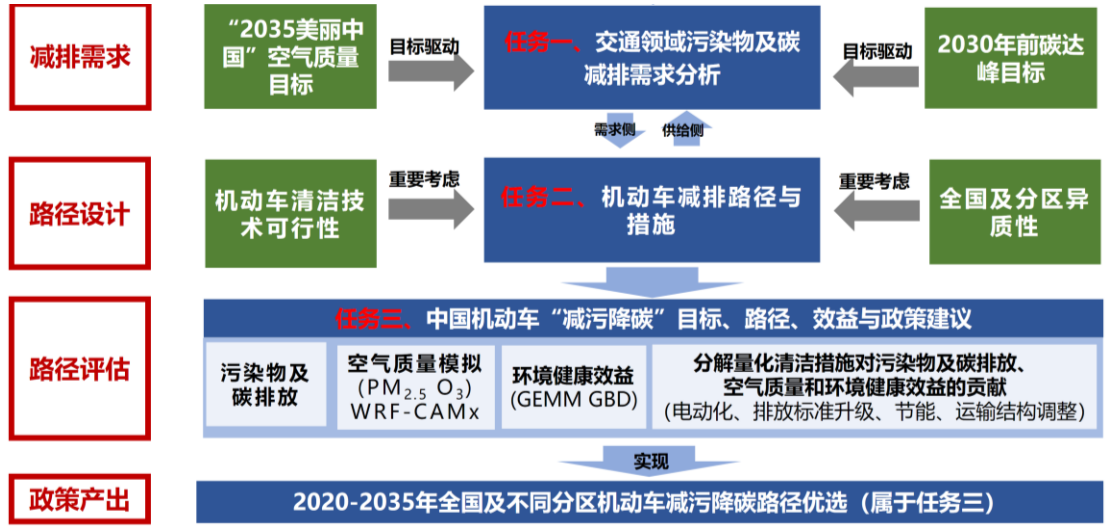


图 1-1 项目技术路线图

1.2.1 “2030 年前碳达峰”与“2035 美丽中国”目标驱动下的交通领域减排需求分析

以 2030 年前碳排放达峰为约束，考虑 2060 年前碳中和目标，研究机动车领域 2020-2035 年二氧化碳排放路径。以“2035 美丽中国”空气质量改善目标为约束，利用 WRF-CAMx（Weather Research Forecasting-Comprehensive Air Quality Model with Extensions model）模型，模拟不同污染物的减排需求，进一步研究“2035 美丽中国”空气质量目标驱动下交通领域各污染物减排需求。在量化交通领域二氧化碳和大气污染物减排需求时，本项目结合了交通领域发展阶段、技术进步及相关政策规划，并综合考虑了其他行业发展变化对交通领域产生的影响。

1.2.2 全国及不同分区的机动车减污降碳路径情景

中国不同地区经济发展极不平衡、冬季气温迥异、公共交通发展差距很大，机动车管控政策的宽松程度不同，都会影响未来机动车零排放路径。此外，电动化、排放标准、节能和运输结构调整等机动车减排等政策对二氧化碳和不同污染

物的减排贡献重要性不同。因此，本研究针对全国及不同分区，考虑电动化、排放标准、节能措施和运输结构调整等不同政策实施力度及技术可行性，提出了区域差异化的减排技术路径、控制措施与情景方案。

1.2.3 中国机动车“减污降碳”路径、空气质量改善及环境健康效益

耦合 WRF-CAMx 空气质量模型、全球暴露死亡模型（Global Exposure Mortality Model, GEMM）和全球疾病负担研究中采用的方法学（Global Burden of Disease Study, GBD），评估了 2020-2035 年全国及各分区在不同的机动车零碳排放路径下的二氧化碳与污染减排、PM_{2.5} 与 O₃ 浓度改善及其健康影响效益；并以 5 年为步长量化不同机动车清洁措施对二氧化碳及污染物排放、空气质量改善及相关健康效益的贡献。进而基于空气质量效益优选最佳路径，系统设置电动化、排放标准升级、节能、运输结构调整等交通减排措施分步骤实施的路线图，分地区提出中国机动车“减污降碳”相关政策建议。

二、 研究方法及情景设置

2.1 研究范围

研究车型范围。交通领域包括道路机动车、工程机械、农业机械、船舶、铁路内燃机车、飞机排放等。考虑到人群更多地集中在道路周边，道路机动车污染物排放对人体健康产生的危害更大。因此，本报告聚焦道路机动车（不包括低速汽车和摩托车），研究机动车在使用环节化石燃料燃烧引起的二氧化碳和常规大气污染物排放情况。本报告将道路机动车分为出租车、其他微小型客车、公交车、中大型客车、微轻型货车和中重型货车，且考虑了汽油、柴油、天然气等不同燃料类型。

研究时空范围。考虑到“2030 年前碳达峰”和“2035 年美丽中国”空气质量目标时间节点，本报告确定研究时间范围为 2020-2035 年，2020 年为研究基准年。本研究的空间范围为全国（不包含港澳台地区）。经济发展水平是影响机动车保有量的关键因素，且直接影响未来机动车清洁路径的发展速度。充分考虑不同区域差异性特征，进而推进分区域道路清洁化战略，本报告根据 2020 年人均 GDP 将全国划分为 3 个区域：人均 GDP 超过 7 万的发达区域（区域 A）、人均

GDP 为 3 万-5 万的欠发达区域（区域 C）、介于两者之间的发展中区域（区域 B）（图 2-1）。

机动车清洁措施。中国目前是全球电动汽车产销第一大国，《新能源汽车产业规划（2021-2035 年）》^[5]提出到 2035 年纯电动汽车成为新销售车辆的主流，公共领域用车全面电动化。《推进运输结构调整三年行动计划（2018-2020 年）》^[6]和《推进多式联运发展优化调整运输结构行动方案（2021-2035 年）》^[7]中提出要大力推动运输结构调整。《乘用车燃料消耗量限值》（GB 19578）、《轻型商用车燃料消耗量限值》（GB 20997）和《重型商用车燃料消耗量限值》（GB 30510）对不同车型的油耗标准提出了要求。中国自 2023 年 7 月 1 日起，全国范围全面实施国六排放标准 6b 阶段，禁止生产、进口、销售不符合国六排放标准 6b 阶段的汽车^[8]。以上清洁措施在机动车污染物和二氧化碳减排方面发挥了重要作用。因此，本研究重点选择**新能源汽车渗透、运输结构调整（“公转铁、公转水”）、排放标准升级和燃油经济性提升**这四种机动车清洁措施开展全国及不同区域的机动车减污降碳路径研究。

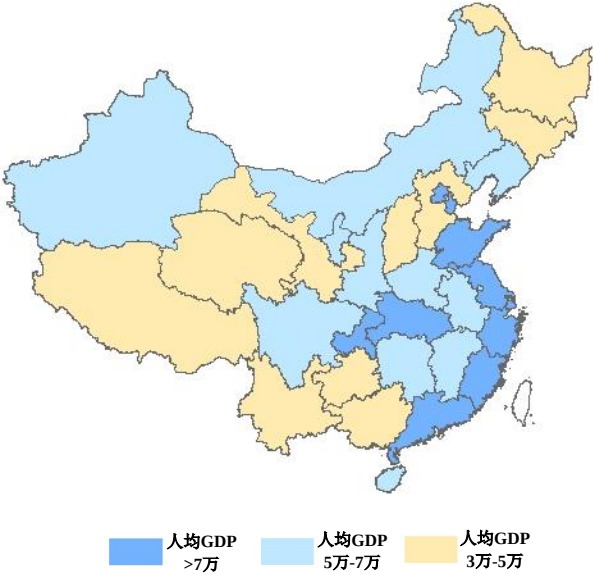


图 2-1 依据人均 GDP 的分区结果

注：区域 A 人均 GDP 最高，区域 C 人均 GDP 最低，区域 B 人均 GDP 介于中间

2.2 保有量预测方法

机动车保有量的预测方法主要通过各种数学统计学模型以及各类机器学习算法，综合考虑各因素的影响效果来进行预测。机动车保有量预测方法大致可以分为 4 类：时间序列法，利用过去的资料预测未来机动车保有量。回归分析法，

通过回归分析获得机动车保有量和影响因素之间的关系，进而预测未来保有量^[9-10]。判断分析法，主要依靠预测人员或专家过去的经验和综合分析能力来预测未来状态。神经网络预测，通过机器学习等智能化的技术预测未来机动车保有量^[11-13]。

表 2-1 机动车保有量预测方法

预测方法	具体方法	特征
时间序列法	趋势外推	简单、所需数据少
回归分析法	因果相关性	所需数据要求高
判断分析法	专家判断	对判断人员的专业性要求高
神经网络预测	黑箱预测	预测结果难以解释

(1) 乘用车保有量预测

本报告中乘用车保有量采用国际上广泛使用的 Gompertz 模型法进行预测，Compertz 模型呈 S 型，反映了机动车保有率随人均 GDP 的增长而呈现缓慢增长、井喷和饱和三个阶段的趋势^[14-16]。本研究首先利用 2002-2020 年人均 GDP 和千人乘用车保有量开展曲线拟合，获得拟合曲线后，再结合对我国到 2035 年经济社会发展的宏观形势判断，对未来乘用车保有量进行预测，预测公式如下：

$$Vp = \gamma e^{\alpha \exp(\beta g)} \tag{1}$$

式中， Vp 为千人乘用车保有量； g 为人均 GDP； γ 为乘用车保有率的饱和值，辆/千人； α 和 β 为模型回归参数。本研究中，千人车保有量（饱和值）取值为 340 辆/千人， α 和 β 取值分别为-4.63 和-0.27。

(2) 商用车保有量预测

商用车采用历史趋势修正法。根据国际经验^[17-23]，在人均 GDP 达到 2.5 万美元之前，商用车保有量与 GDP 或货运量呈线性关系；2.5 万美元之后，商用车保有量基本保持不变。2035 年底前，预测我国人均 GDP 未达到 2.5 万美元，因此利用 2002-2019 年 GDP 和商用车保有量变化情况开展线性拟合，结合对我国 2021-2035 年经济社会发展的宏观形势判断，对未来商用车保有量进行预测。

$$Vc = m \cdot g + n \tag{2}$$

Vc 为商用车保有率（辆/千人）； g 为人均 GDP； m 和 n 为模型回归参数。

2.3 二氧化碳及污染物排放量核算方法

(1) 二氧化碳排放量核算

本报告中采用燃油法核算道路交通领域二氧化碳排放总量^[24]，公式如下：

$$E_{ij} = \sum_i \sum_j AD_{ij} \times EF_i \quad (3)$$

$$AD_{ij} = VP_{ij} \times F_{ij} \times NCV_{ij} \quad (4)$$

$$EF_i = CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (5)$$

$$F_{ij} = FCR_{ij} \times VTK_{ij} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$F_{ij} = FCR_{ij} \times VMC \times VTK_{ij} \times 10^{-5} \quad (7)$$

式中， E_{ij} 为不同燃料类型（ i ）的不同车型（ j ）的 CO_2 排放， AD_{ij} 代表化石燃料的活动数据，单位为吉焦（GJ）， EF_i 为化石燃料的二氧化碳排放因子（ tCO_2/GJ ）。VP 为机动车保有量，F 为化石燃料消耗量（ $\text{t}; 10^4 \cdot \text{m}^3$ ），NCV 为化石燃料的平均低位发热量（ $\text{GJ/t}; \text{GJ}/10^4 \cdot \text{m}^3$ ）。CC 为化石燃料的单位热值含碳量，单位为吨碳每吉焦（ tC/GJ ）；OF 为化石燃料的碳氧化率，单位为百分数（%）；44/12 为二氧化碳与碳的分子量之比，单位为吨二氧化碳每吨碳（ tCO_2/tC ）。FCR 表示每百公里燃料消耗量（ $\text{L}/100\text{km}; \text{m}^3/100\text{km}$ ），VTK 为机动车年均行驶里程（km），VMC 表示体积质量转换系数（ kg/L ）。

(2) 大气污染物排放量核算

本报告中采用行驶里程法核算道路交通领域大气污染物排放总量^[25]，公式如下：

$$E = P \times EF \times VKT \quad (8)$$

式中，E 代表大气污染物排放量，P 为机动车保有量，EF 为排放因子（ g/km ），VKT 为机动车年均行驶里程（km）。

目前仅有国一前到国五的污染物排放因子。国六排放标准已经实施，本研究中的国六排放因子根据 GB18352.6-2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法

（中国第六阶段）》和 GB17691-2018《重型柴油车污染物排放限值 and 测量方法（中国第六阶段）》进行预测。本研究假设相比于国 V，国 VI 可以将重型柴油车的 NO_x 、VOCs 和 PM 排放分别减少约 78%、70%和 50%，将轻型车的 CO、VOC 和 NO_x 排放分别降低约 50%、50%和 42%。为进一步控制机动车污染排放，降低对人群健康的影响，按照排放标准加严速度，本研究假设国七排放标准将会于 2026 年实施，且一直到 2035 年国七依旧是最严的排放标准。考虑到国六排放标准已经是史上最严，全球最先进的标准之一，本研究认为国七污染物排放因子降幅类似国六降幅变化的难度较大，因此假设国七排放标准相对于国六的降幅参照国五降幅设置。

2.4 WRF-CAMx 空气质量模型

本研究利用中尺度气象模型 WRF^[26]和空气质量模型 CAMx^[27]来定量不同机动车清洁措施对 2020-2035 年空气质量改善的贡献。CAMx 模型所需排放清单的化学物种主要包括 SO_2 、 NO_x 、颗粒物（ PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分）、 NH_3 和 VOCs 等多种污染物。 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、OC、 NH_3 、VOCs（含主要组分）等人为源排放数据均来自 2020 年 MEIC 排放清单（<http://www.meicmodel.org>）^[28-29]，生物源 VOCs 排放清单利用 MEGAN 天然源排放清单模型（Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature model）计算^[30]。在本研究中，假设从 2020 年到 2035 年，除交通领域外，其他行业的污染物排放量保持不变，因此最终空气质量改善仅归因于道路交通清洁化贡献。此外，机动车领域的污染物排放清单根据本研究中测算的不同机动车清洁路径的排放量结果进行更新。

CAMx 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供；CAMx 模型采用 Lambert 投影坐标系；模拟范围为中国大陆地区，X 方向为-2690–2690 km、Y 方向为-2150–2150 km；网格间距为 20km，共将全国划分为 270×216 个网格；垂直方向共设置 14 个气压层，层间距自下而上逐渐增大。

对于 WRF 模型，其与 CAMx 模型采用相同的模拟时段和空间投影坐标系；WRF 模型的初始场与边界场数据采用美国国家环境预报中心（NCEP）提供的 6h 一次、1°分辨率的 FNL 全球分析资料（<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>），每日对初始场进行初始化，每次模拟时长为 30h，Spin-up 时间设置为 6h，并利用 NCEP ADP 观测资料进行客观分析与资料同化（<http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0/>）。

2.5 环境健康模型

除定量机动车清洁化带来的空气质量改善效益外,本研究还进一步利用全球暴露死亡模型 (Global Exposure Mortality Model, GEMM)^[31]和全球疾病负担研究中采用的方法学 (Global Burden of Disease Study, GBD), 分别计算了机动车清洁路径下 PM_{2.5} 和 O₃ 长期暴露改善带来的健康效益。定量模拟环境健康效益需要网格化的空气质量数据和人口数据。网格化的空气质量数据在 2.4 节中模拟获得, 空间分辨率为 20 km×20 km; 人口空间分布数据来自中国科学院地理科学与资源研究所提供的 1 km×1 km 分辨率网格人口数据集^[32]。

本研究在计算 PM_{2.5} 健康效应时选用了 GEMM 模型, 考虑的健康终点包括慢性阻塞性肺病、缺血性心脏病、肺癌、中风和下呼吸道感染等。本研究在计算 O₃ 健康效应时选用了 GBD 研究中采用的综合暴露响应模型 (Integrated Exposure-Response Model, IER)^[33], 考虑的健康终点包括呼吸系统问题与心血管疾病。计算公式如下:

$$\text{Mort} = \text{AF} \times \text{Pop} \times \gamma_0 \quad (9)$$

$$\text{AF} = \frac{\text{RR}-1}{\text{RR}} \quad (10)$$

式中, Mort 表示归因于 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露的超额死亡人数; AF 为归因系数, 表示总死亡中归因于大气污染物暴露的占比; Pop 表示网格化人口数据; γ_0 表示对应疾病的基准死亡率, 本研究中采用的基准死亡率数据来源于全球疾病负担研究 (GBD); RR 为相对风险度, 表示一定暴露浓度情景下的人群健康效应与无暴露情景下人群健康效应的比值^[34]。

三、“2030 年前碳达峰”与“2035 美丽中国”目标驱动下的交通领域减排需求分析

3.1 道路交通二氧化碳减排需求

交通领域发展阶段、技术进步及相关政策规划, 以及其他行业的发展变化均会对道路交通的二氧化碳排放产生影响。本研究团队聚焦电力、钢铁、水泥、铝

冶炼、石化化工、煤化工共 6 个重点行业以及建筑、交通 2 个重点领域，已经开展了碳排放达峰路径系列研究^[35-36]。研究中采取“自上而下”和“自下而上”相结合的方式，以满足社会经济高质量稳定发展需求和国家碳达峰碳中和双重目标为约束开展自上而下的宏观路径研究；以重点行业和领域为对象，开展自下而上的重点行业/领域碳达峰路径研究；通过“自上而下”和“自下而上”路径反复迭代、行业间耦合优化，打通宏观路径与微观措施的联动和双向反馈，最终形成基于重点行业/领域的我国碳达峰路径。

我国新能源汽车发展速度远超预期，2022 年全国新能源汽车渗透率为 25.6%，提前完成《新能源汽车产业发展规划》（2021—2035 年）中提出的 2025 年新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的 20%左右的目标。此外，汽车行业属于全球化的产业，欧美、日韩等发达经济体的交通碳中和战略必然会传导影响到中国交通行业的零排放进程。因此，基于研究团队已经开展的碳排放达峰路径系列研究成果，综合考虑新能源汽车渗透速度及全球整体形势，采用 CAEP-CP 模型进行重新模拟^[37]（图 3-1）。**结果表明，对于道路交通，CO₂ 排放需要于 2024 年-2026 年左右达峰，峰值约为 11.6-13.0 亿吨左右。**

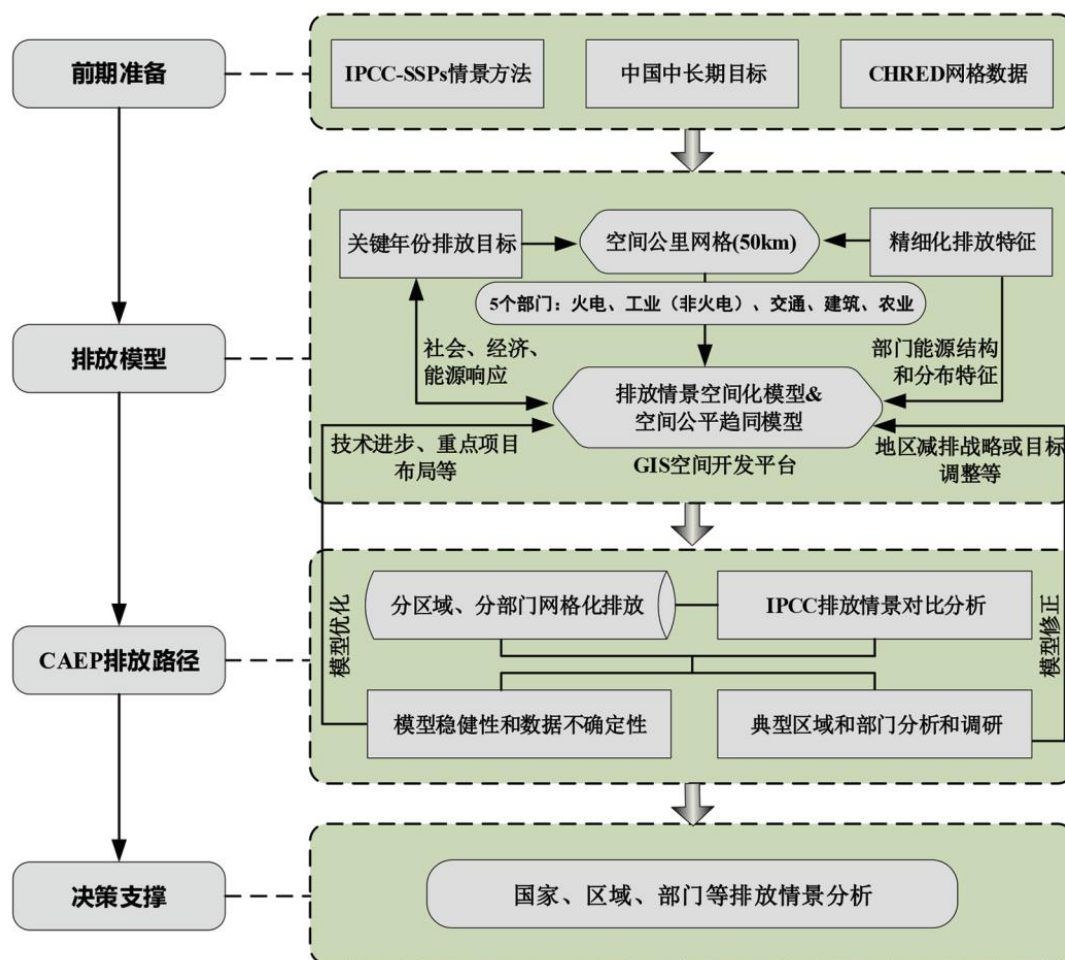


图 3-1 CAEP-CP 研究技术路线图^[37]

3.2 面向“美丽中国”的污染物减排需求

3.2.1 “美丽中国 2035”空气质量目标

（一）“美丽中国 2035”空气质量目标设置

党的十九届五中全会提出，我国到 2035 年生态环境根本好转，基本实现社会主义现代化，人均国内生产总值（GDP）达到中等发达国家水平，经济总量或人均收入相对 2020 年翻一番，即略高于 2 万美元，约为当前南欧及东欧部分国家的经济发展水平。南欧及东欧部分国家当前 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度约为 15~30 微克/立方米。主要发达经济体中，美国、西欧各国和日本当前年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 8~15 微克/立方米之间，在其人均 GDP 达到 2 万美元时，年均浓度约为 15~30 微克/立方米；韩国自 2006 年人均 GDP 超过 2 万美元之后至今，其年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 25 微克/立方米附近上下波动。

按照“美丽中国”空气质量改善愿景，对标发达国家的经济发展与环境空气质量改善历程，至 2035 年我国迈入中等发达国家行列时，宜以 25 微克/立方米作为全国 PM_{2.5} 浓度目标，达到欧盟现行 PM_{2.5} 浓度标准和 WHO 过渡时期第二阶段目标。过去十五年间，美国的 PM_{2.5} 浓度降幅约为 36%，日本则约为 44%，欧盟 PM_{2.5} 浓度在 2008-2017 共十年间下降了 30%，均在较低浓度水平条件下实现了 PM_{2.5} 浓度大幅改善。着眼于国际经验，初步考虑我国 PM_{2.5} 年均浓度在 2035 年下降至 25 微克/立方米，全国 95% 左右的城市达到现行环境空气质量标准。

（二）城市层面空气质量目标测算规则

为实现全国 PM_{2.5} 浓度到 2035 年下降至 25 微克/立方米的目標，需要各城市设定自身 PM_{2.5} 浓度改善目标值，驱动全国空气质量改善。本项目根据各城市污染水平，分级制定浓度下降比例需求。整体上，城市基准年 2020 年 PM_{2.5} 浓度越高，需要进行改善的幅度越大。其中：基准 PM_{2.5} 浓度在 60 微克/立方米以上的城市，其 PM_{2.5} 浓度需要在 2020 年的基础上下降 35%；基准 PM_{2.5} 浓度在 51~60 微克/立方米（含）的城市，2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度需要下降 30%；基准 PM_{2.5} 浓度在 41~50 微克/立方米（含）的城市，2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度需要下降 25%；基准 PM_{2.5} 浓度在 36~40 微克/立方米（含）的城市，2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度需要下降 15%；基准 PM_{2.5} 浓度在 31~35 微克/立方米（含）的城市，2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度需要下降 10%；基准 PM_{2.5} 浓度在 25~30 微克/立方米（含）的城市，2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度需要下降 5%；基准 PM_{2.5} 浓度在 25 微克/立方米（含）以下的城市空气质量持续改善，原则上不设降幅目标（表 3-1）。对和田地区、喀什地区等 21 个绿洲城市，按照其扣除沙尘影响后的 PM_{2.5} 浓度所在的区间提出对应的改善要求。

表 3-1 分档测算规则-PM_{2.5} 浓度降幅需求

基数 PM _{2.5} 浓度	下降比例（%）
60 微克/立方米以上	35
51-60 微克/立方米（含）	30
41-50 微克/立方米（含）	25
36-40 微克/立方米（含）	15
31-35 微克/立方米（含）	10
25-30 微克/立方米（含）	5

25 微克/立方米（含）以下	持续改善
----------------	------

（三）测算结果分析

（1）若到 2035 年 PM_{2.5} 浓度实现降至 25 微克/立方米的目標，則全國 PM_{2.5} 年均濃度需要在 2020 年基礎上下降 24.2%。此外，不同區域的機動車清潔路徑具有明顯區域異質性，為更好地研究分區域機動車清潔路徑，本研究按照經濟發展水平將全國 31 省份劃分為 3 個不同區域（詳見 2.1 節）。項目組也測算了不同區域到 2035 年的 PM_{2.5} 濃度及降幅需求：到 2035 年，區域 A（人均 GDP 水平最高）、區域 B 和區域 C（人均 GDP 水平最低）的 PM_{2.5} 濃度均值分別為 25、28 和 23 微克/立方米左右，相比 2020 年分別下降 21.9%、24.3%、17.9%。

（2）本項目除考慮到 2035 年 PM_{2.5} 濃度降至 25 微克/立方米的目標外，也考慮了到 2035 年全國 PM_{2.5} 平均濃度達到 WHO 過渡時期第三階段目標 15 微克/立方米的激進情況。若到 2035 年 PM_{2.5} 濃度實現 15 微克/立方米的目標，則全國 PM_{2.5} 平均濃度需相比 2020 年下降 54.5%，全國 100% 左右的城巿達到現行環境空氣質量標準。對於 3 個不同區域，2020-2035 年 PM_{2.5} 濃度降幅均需達到 50% 以上，具體來看，區域 A、區域 B 和區域 C 的 PM_{2.5} 濃度均值分別為 15、17 和 14 微克/立方米左右，相比 2020 年分別下降 53.1%、54.1%、50.0%。

表 3-2 2035 年全國及各分區 PM_{2.5} 改善目標

區域	2020 年基數 (μg/m ³)	2025 年目標 (μg/m ³)	目標 25		目標 15	
			濃度 (μg/m ³)	相比 2020 年變幅	濃度 (μg/m ³)	相比 2020 年變幅
全國	33	30	25	-24.2%	15	-54.5%
A 區	32	29	25	-21.9%	15	-53.1%
B 區	37	32	28	-24.3%	17	-54.1%
C 區	28	26	23	-17.9%	14	-50.0%

3.2.2 道路交通污染物減排需求

（一）模擬方法

全口徑減排需求核算：本節以 2035 年 PM_{2.5} 濃度目標為約束，耦合排放清單和 WRF-CAMx 空氣質量模型，定量核算 PM_{2.5} 目標約束下 SO₂、NO_x、PM_{2.5}

等多污染物的环境容量，进一步结合基准年污染物排放量，核算全口径多污染物排放量的减排需求。以 $\text{PM}_{2.5}$ 达标约束下的多污染物环境容量本质是各空间大气污染物的最大允许排放量，核心技术是多种污染物排放量在空间和污染物指标的多目标最优化问题。识别研究区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 组分中硫酸盐、硝酸盐、铵盐、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比例，解析 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 等前体物对 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染贡献，分析大气污染物排放与 $\text{PM}_{2.5}$ 的响应关系，建立多种前体物贡献矩阵。采用贡献大的前体物优先削减原则，制定不同污染物削减方案。以 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标为约束，以各空间、各种污染物排放量最大为目标，计算最大允许排放量，即 $\text{PM}_{2.5}$ 目标约束下的环境容量。结合基准年污染物排放量，核算 2035 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标约束下的全口径污染物减排需求。

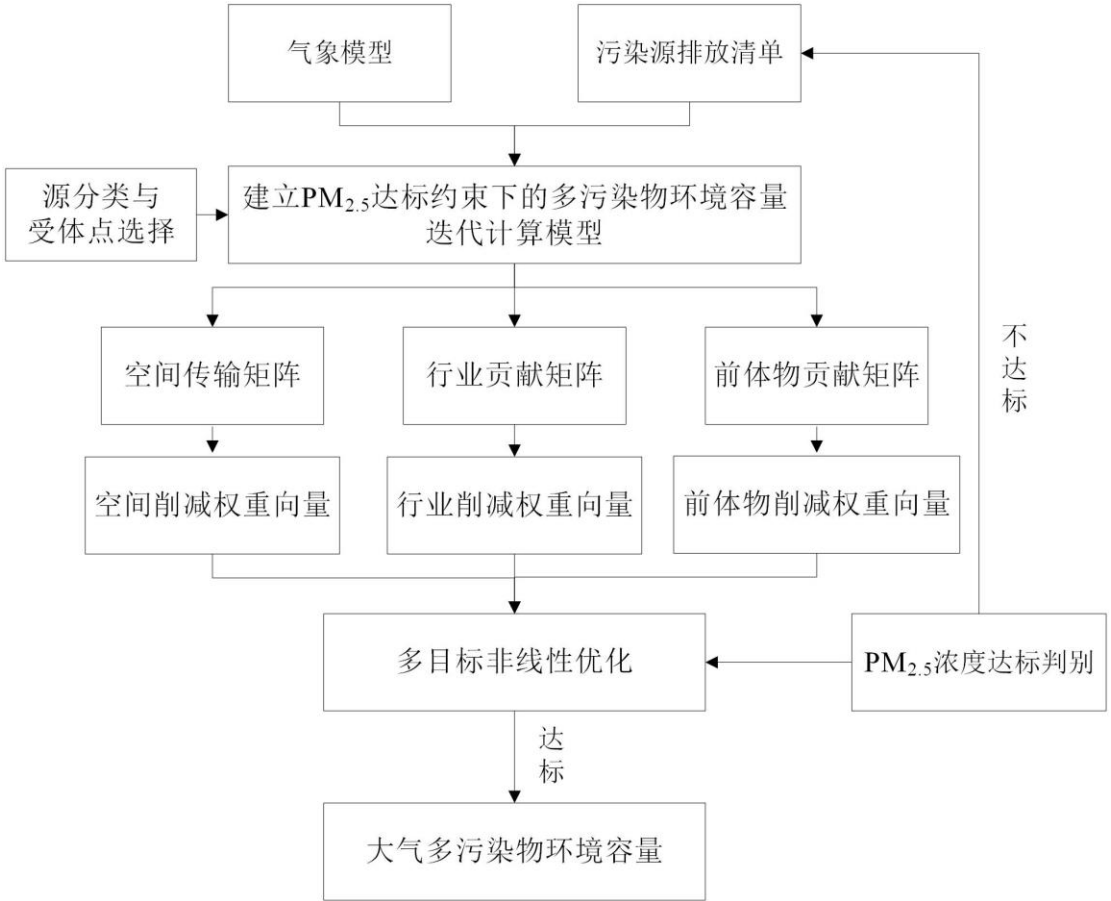


图 3-2 基于三维优化的大气环境容量核算方法^[38]

道路交通减排需求分解：依据“对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献大小，分担减排责任”的原则，将全口径污染物减排需求分解到道路交通领域。本项目耦合了排放表征、

大气化学传输模型、污染源解析和源敏感性模拟技术等跨学科工具，从空间-行业多维度多尺度系统识别了全国 338 个地级及以上城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染来源，获得了不同空间及行业（电力、工业、生活、交通、农业）对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献，建立了空间-行业交叉传输贡献矩阵。进一步利用空间-行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的交叉贡献矩阵，将 2035 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标约束下的全口径污染物减排需求分解到道路交通领域。

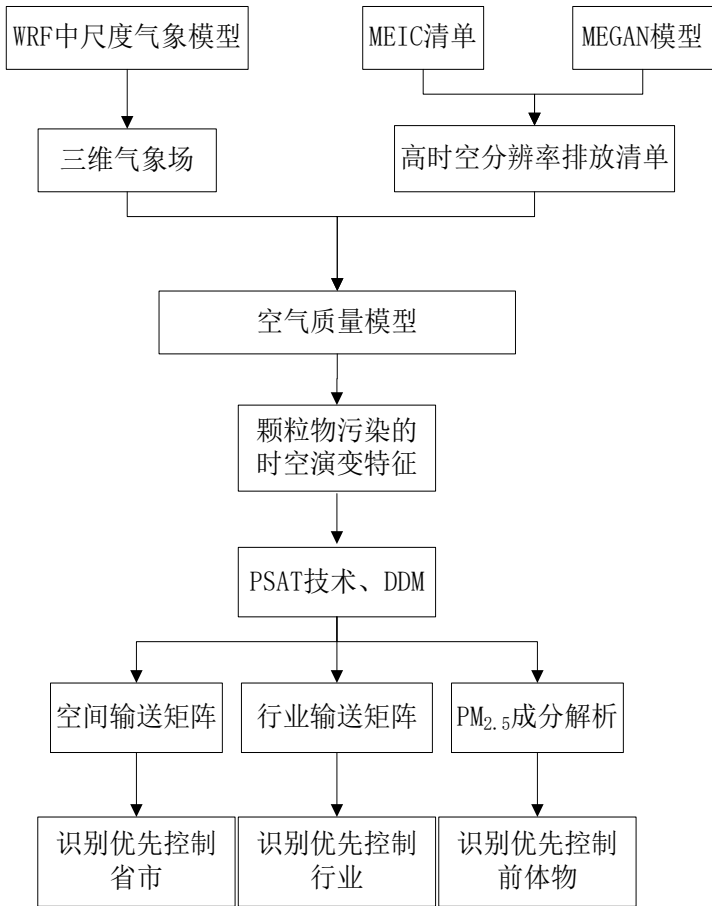


图 3-3 $\text{PM}_{2.5}$ 空间输送-行业贡献解析技术路线

（二）美丽中国空气质量目标驱动下的污染物减排需求

全口径减排需求：模型分析表明，从全国层面来看，若考虑到 2035 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 25 微克/立方米的目標，2020-2035 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度需要下降 24.2%，对应需减排 32%的 NO_x 、 VOCs ，同时削减相应比例的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和大气 NH_3 等污染物排放。若考虑全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 15 微克/立方米的目標，则 2020-2035 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度需要下降 54.5%，对应需减排 61%的 NO_x 、 VOCs ，同时削减相应比例的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和大气 NH_3 等污染物排放。不同分区的全

口径污染物减排比例需求见表 3-3。

表 3-3 2035 年各项污染物减排比例需求（全行业/领域口径）

目标 25 约束下全口径 2035 年各项污染物减排比例需求				
污染物减排需求	全国	区域 A	区域 B	区域 C
SO ₂	-14%	-12%	-14%	-10%
NO _x	-32%	-30%	-32%	-22%
VOCs	-32%	-29%	-32%	-22%
NH ₃	-23%	-20%	-23%	-16%
PM _{2.5}	-36%	-33%	-36%	-25%
目标 15 约束下全口径 2035 年各项污染物减排比例需求				
污染物减排需求	全国	区域 A	区域 B	区域 C
SO ₂	-29%	-26%	-29%	-20%
NO _x	-61%	-58%	-61%	-43%
VOCs	-61%	-55%	-62%	-43%
NH ₃	-44%	-39%	-44%	-31%
PM _{2.5}	-70%	-63%	-70%	-49%

道路交通减排需求：考虑到机动车排放的主要污染物类型包括 NO_x、VOCs 和颗粒物，因此主要测算了机动车的这三项污染物的减排需求。利用空间-行业对 PM_{2.5} 浓度的交叉贡献矩阵，将全口径污染物减排需求分解到道路交通领域。从全国层面看，模型分析表明，若考虑到 2035 年全国 PM_{2.5} 年均浓度达到 25 微克/立方米的目標，全国道路交通 NO_x、VOCs、PM_{2.5} 排放需在 2020 年的基础上分别减排约 45%、40%和 30%。若考虑到 2035 年全国 PM_{2.5} 年均浓度达到 15 微克/立方米，全国道路交通 NO_x、VOCs、PM_{2.5} 排放需在 2020 年的基础上分别减排约 80%、72%和 50%。不同分区的道路交通排放污染物减排比例需求见表 3-4。

表 3-4 道路交通 2035 年各项污染物减排比例需求

目标 25 约束下道路交通 2035 年各项污染物减排比例				
污染物减排需求	全国	区域 A	区域 B	区域 C
NO _x	-45%	-47%	-45%	-42%

VOCs	-40%	-42%	-40%	-36%
PM _{2.5}	-30%	-32%	-30%	-28%
目标 15 约束下道路交通 2035 年各项污染物减排比例				
污染物减排需求	全国	区域 A	区域 B	区域 C
NO _x	-80%	-82%	-80%	-78%
VOCs	-72%	-75%	-72%	-68%
PM _{2.5}	-50%	-51%	-50%	-47%

四、全国及不同分区的机动车减污降碳路径情景

4.1 基准年车队结构

根据《城市大气污染源排放清单编制技术手册》，对于机动车，不同车型、不同燃料类型、不同排放标准阶段的污染物排放因子（g/km）均不同。因此，为核算机动车的污染物排放量，需要确定基准年不同车型的排放标准结构。本研究基于 1999 年以来各年份 337 城市不同汽车类型的保有量、注册量（分车型、分燃料类型）数据库，结合车辆登记注册日期、全国新生产机动车排放标准实施进度和机动车使用年限标准^[39]，更新推定 2020 年车队排放标准结构。研究结果表明，2020 年，国 4 和国 5 在整个车队中的占比整体较高；国 3 在中大型客车、中重型货车和微轻型货车中占比较高，约 26%-36%；公交车队中新能源占比超过 60%。

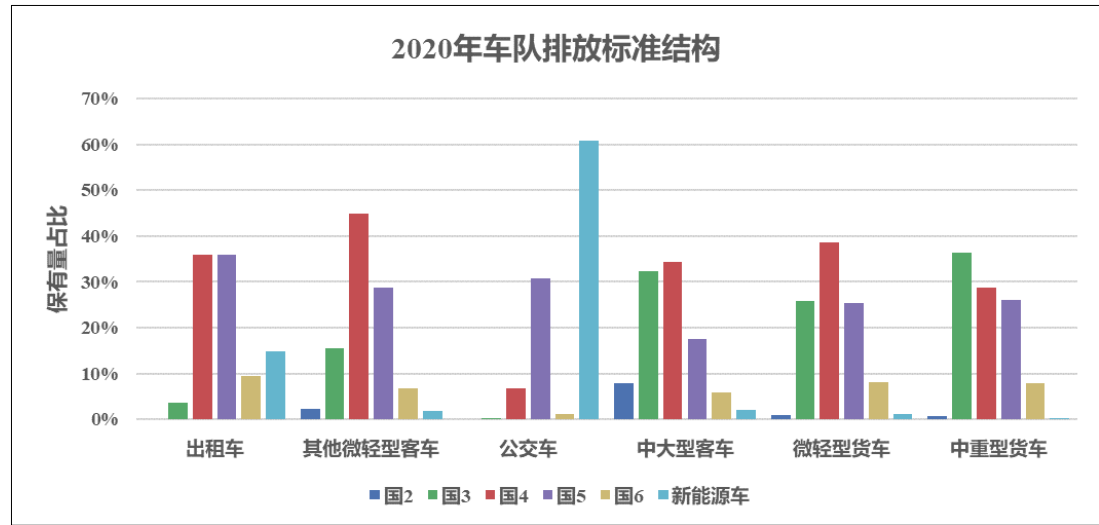


图 4-1 2020 年不同车型的车队结构

4.2 机动车保有量预测

本研究利用 Gompertz 模型和线性模型分别预测了至 2035 年乘用车和商用车的保有量，具体预测方法介绍见 2.2 部分，全国 GDP 年均增速(%)、人口(亿人)、人均 GDP(元)等关键参数设置见表 4-1。2022 年中国出现近 61 年来的首次人口负增长^[40]；此外，参考联合国发布的《世界人口展望 2022》^[41]中主要国家及中国的人口变化趋势，设置本研究中的人口情景。在本研究中，中国人口数量在十四五期间达到峰值，到 2035 年全国人口约为 14.02 亿人。《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》^[42]提出到 2035 年中国人均国内生产总值达到中等发达国家水平。在本研究中，预测到 2025 年，我国人均 GDP 约为 9.0 万元；到 2030 年，我国人均 GDP 约为 11.7 万元；到 2035 年，我国人均 GDP 约为 14.7 万元。本项目研究结果表明到 2025 年、2030 年和 2035 年全国机动车总量预计分别为 3.68 亿辆，4.39 亿辆和 4.7 亿辆。到 2035 年，乘用车保有量约 4.1 亿辆，商用车保有量约 5000 万辆。对于三个经济发展水平不同的区域，2020 年-2035 年区域 A（经济发达区域）机动车保有量在全国总保有量中占比约为 41%-45%；区域 B 为 32%-34%；区域 C（经济欠发达）为 23%-25%。整体上，2020 年-2035 年区域 A 的机动车保有量占比逐年下降，区域 B 和区域 C 逐年上升。

表 4-1 保有量预测关键参数

年份	全国 GDP 年均增速(%)	年份	人口（亿人）	人均 GDP（元）
2020-2025	4.6	2025	14.11	90231
2025-2030	5.2	2030	14.07	116701
2030-2035	4.7	2035	14.02	146975

4.3 全国及不同分区机动车减污降碳路径情景

本报告考虑了排放标准升级、新能源渗透、公转铁水、燃油经济性提升四大机动车清洁措施。针对四大清洁措施 2020-2035 年的发展路径，本研究设置了温和情景与激进情景两种情景。本研究中假定机动车污染物排放可稳定达到相应机动车的污染物排放标准；机动车实际使用油耗与理论油耗一致。

4.3.1 排放标准升级情景分析

中国从 2000 年开始实施机动车尾气排放标准,之后每 3-5 年进行一次升级,目前已经从“国一”升级到“国六”,污染物排放因子大幅下降^[43]。为进一步控制机动车污染排放,降低对人群健康的影响,本研究假设国七排放标准将会于 2026 年实施,且一直到 2035 年国七依旧是最严的排放标准;且假设国七污染物排放因子相对于国六的降幅参照国五降幅设置。本研究基于 1999 年以来各年份 337 城市不同汽车类型的保有量、注册量数据库,结合车辆登记注册日期、全国新生产机动车排放标准实施进度(图 4-2)和机动车使用年限标准(表 4-2),推定 2020 年-2035 年车队排放标准结构。由于机动车使用年限全国统一,因此没有分区域设置排放标准演变路径,仅从全国层面设置了温和情景与激进情景。

温和情景: 出租车、其他微小型客车、公交车、中大型客车、微轻型货车和中重型货车的使用年限分别为 8 年、18 年、13 年、16 年、13 年和 15 年。

激进情景: 出租车、其他微小型客车、公交车、中大型客车、微轻型货车和中重型货车的使用年限分别为 8 年、15 年、10 年、13 年、10 年和 12 年。

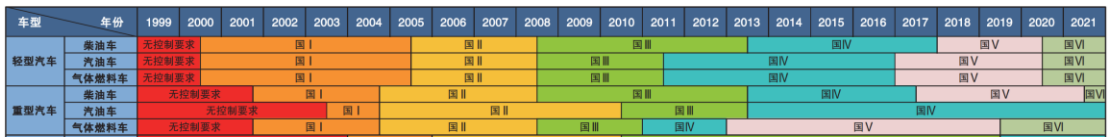


图 4-2 全国新生产机动车排放标准实施进度^[39]

表 4-2 机动车使用年限(年)

	温和情景	激进情景
出租车	8	8
其他微小型客车(包括私家车)	18	15
公交车	13	10
中大型客车	16	13
微轻型货车	13	10
中重型货车	15	12

4.3.2 燃油经济性提升情景分析

本报告参考相关规划和研究,如《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》^[44]等,进行情景设置。由于机动车油耗受到道路状况、驾驶习惯、发动机、温度、汽车整体设计等多种复杂因素的影响,机动车油耗在不同区域间的差别很难定量判断。因此本研究中没有分区域设置机动车燃油经济性发展路径,仅从全国层面设置了温和情景与激进情景。

温和情景：新生产乘用车年均燃料消耗量（WLTC 测试工况）在 2025 年、2030 年和 2035 年分别降至 5.6L/100 km、4.8 L/100 km 和 4.0 L/100 km；新生产传统燃料商用客车油耗较 2019 年分别下降 6%、8%和 13%；新生产传统燃料商用货车油耗较 2019 年分别下降 8%、10%和 15%。

激进情景：新生产乘用车年均燃料消耗量（WLTC 测试工况）在 2025 年、2030 年和 2035 年分别降至 5.4L/100 km、4.5 L/100 km 和 3.8 L/100 km；新生产传统燃料商用客车油耗较 2019 年分别下降 12%、16%和 26%；新生产传统燃料商用货车油耗较 2019 年分别下降 16%、20%和 30%。

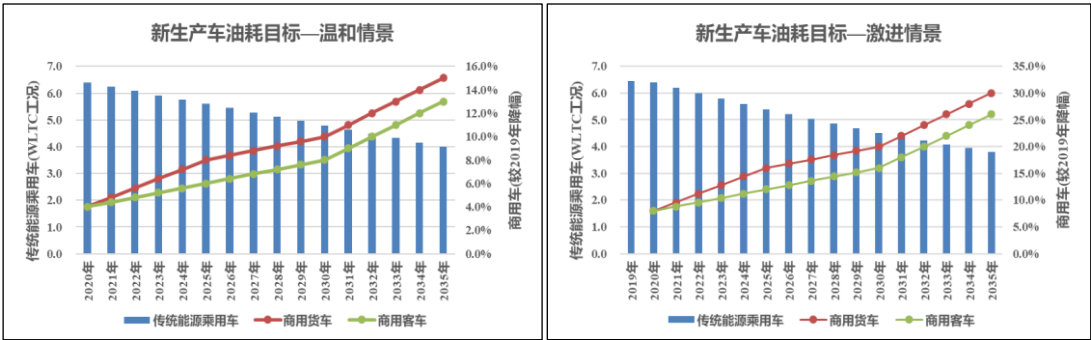


图 4-3 全国新生产机动车油耗目标

4.3.3 “公转铁-公转水” 情景分析

持续推动大宗货物运输“公转铁”“公转水”，可有效减少公路运输排放，尤其是重型柴油车的排放。“公转铁”“公转水”受到铁路水路网络资源、投资成本、运输成本等多种因素影响，因此不同区域铁路和水路货运量占比呈现明显的区域差异性特征^[45]。2020 年区域 A 的总货运量约为 184.9 亿吨，其中公路货运量占比为 69%，铁路和水路货运量占比分别为 4%和 27%。2020 年区域 B 的总货运量约为 177.2 亿吨，其中公路货运量占比为 77%，铁路和水路货运量占比分别为 12%和 11%。2020 年区域 C 的总货运量约为 100.0 亿吨，其中公路货运量占比为 80%，铁路和水路货运量占比分别为 16%和 4%。在本研究中，基于现有运输结构，依据现行“公转铁”“公转水”政策，参考《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[46]，对政策趋势进行趋势外推，分区域设置到 2035 年“公转铁”“公转水”情景。在本研究中，仅考虑运输结构调整对货运的影响，未考虑对客运的影响。

温和情景：假设 2030-2035 年铁水路货运量在总货运量中占比保持不变。区

域 A 在 2025 年、2030 年和 2035 年的铁水货运量在总货运量中的占比提升至 32.0%、33.6%和 33.6%；区域 B 提升至 24.0%、26.0%和 26.0%；区域 C 提升至 20.8%、21.8%和 21.8%。

激进情景：区域 A 在 2025 年、2030 年和 2035 年的铁水货运量在总货运量中的占比提升至 32.2%、34.2%和 35.2%；区域 B 提升至 24.3%、26.9%和 28.2%；区域 C 提升至 21.0%、22.4%和 23.1%。

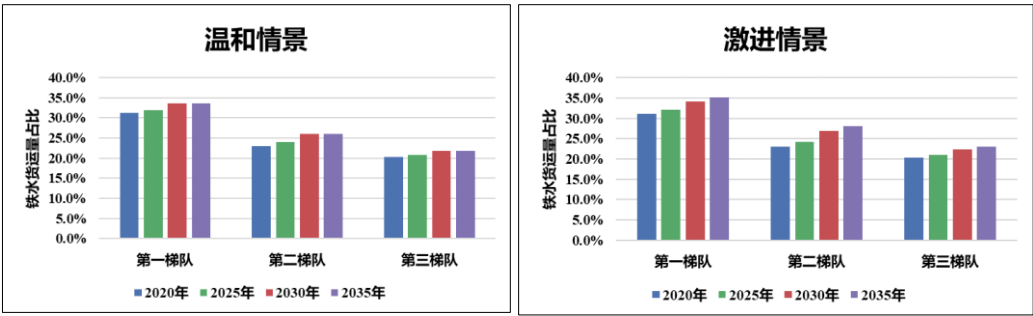


图 4-4 分区域交通运输结构调整目标

注：铁水货运量占比=铁路货运量占比+水路货运量占比

4.3.4 新能源汽车渗透情景分析

电动汽车在使用阶段不消耗化石燃料，相比于传统汽车，具有较强的节能效益、环保效益和碳污减排效益。目前，我国已经成为电动汽车的主要市场，政策体系较为完善，关键技术也处于国际先进水平。《新能源产业发展规划（2021—2035 年）》^[5]提出到 2025 年底前新能源车销售占比达到 20%；2035 年纯电动汽车成为新销售车辆的主流，公共领域用车全面电动化。2022 年新能源汽车渗透率为 25.6%，提前超预期完成了“规划”中提出的“十四五”新能源渗透目标。本研究参考《新能源产业发展规划（2021—2035 年）》^[5]与《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》^[44]，并考虑当前中国新能源汽车发展速度，结合文献调研和行业专家咨询进行新能源汽车渗透情景设置。在本研究中，仅考虑了机动车使用阶段的污染物及二氧化碳排放，没有考虑原材料获取、汽车生产制造及车辆报废阶段的排放^[47]。此外，本项目没有区分不同机动车的技术结构，如插电混动汽车、氢能汽车等其他新能源汽车的占比，假设所有新能源车使用阶段均为零排放。由于不同地区经济发展、气温和机动车管控政策等都会影响新能源汽车发展情况，因此不同分区的新能源汽车渗透率具有明显差异性，本研究分区域设置了 2020-2035 年新能源渗透发展情景。整体上，区域 A（人均 GDP 最高）的新能源渗透

率水平整体较高，区域 C（人均 GDP 最低）的新能源渗透率水平整体较低。以下为从分区域汇总到全国层面的新能源渗透率情况。

温和情景：到 2030 年，全国出租车（包括网约车）、其他微轻型客车（主要为私家车）、城市公交、中大型客车、微轻型货车、中重型货车的新能源渗透率分别为 95%、50%、99%、14%、12%和 7%；到 2035 年，全国各新能源汽车渗透率分别为 98%、60%、99%、20%、19%和 16%。

激进情景：到 2030 年，全国出租车（包括网约车）、其他微轻型客车（主要为私家车）、城市公交、中大型客车、微轻型货车、中重型货车的新能源渗透率分别为 100%、65%、100%、25%、30%和 15%；到 2035 年，全国各新能源汽车渗透率分别为 100%、95%、100%、40%、50%和 40%。

整体上，出租车和公交车到 2035 年基本实现新售车中全部是新能源车；中大型客车、中重型货车和微轻型货车在 2035 年前的新能源汽车渗透率比较低。

表 4-3 全国新能源渗透率（销售新车中新能源车占比）

温和情景			
	2025 年	2030 年	2035 年
出租车	90%	95%	98%
其他微轻型客车	35%	50%	60%
城市公交	99%	99%	99%
中大型客车	9%	14%	20%
微轻型货车	8%	12%	19%
中重型货车	5%	7%	16%

表 4-4 全国新能源渗透率（销售新车中新能源车占比）

激进情景			
	2025 年	2030 年	2035 年
出租车	98%	100%	100%
其他微轻型客车	45%	65%	95%
城市公交	98%	100%	100%
中大型客车	13%	25%	40%
微轻型货车	15%	30%	50%
中重型货车	8%	15%	40%

4.4 未来车队结构预测

不同车型、不同排放标准阶段的污染物排放因子不同，因此为核算至 2035

年机动车的污染物排放量，首先需要确定不同类型机动车车队的排放标准结构。

本研究基于 2020 年基准年的车队结构以及至 2035 年机动车保有量预测结果，依据排放标准升级、燃油经济性提升、“公转铁水”和新能源汽车渗透等情景路径，推断至 2035 年温和、激进情景下不同类型机动车的车队结构。结果表明，对于出租车和公交车：温和、激进情景下到 2035 年新能源车在总保有量中占比约为 95%-99%，基本实现全面电动化。对于其他微轻型客车（主要是私家车）：到 2035 年新能源车在总保有量中占比约 38%（温和情景）、61%（激进情景）。对于中大型客车：到 2035 年新能源车在总保有量中占比约 12%（温和情景）、22%（激进情景）。对于微轻型货车：到 2035 年新能源车在总保有量中占比约 14%（温和情景）、38%（激进情景）。对于中重型货车：到 2035 年新能源车在总保有量中占比约 8%（温和情景）、21%（激进情景）。此外，在传统能源汽车中，到 2035 年传统能源汽车中排放标准以国 7 为主（本研究中假设国 7 直到 2035 年一直是最新的排放标准）。

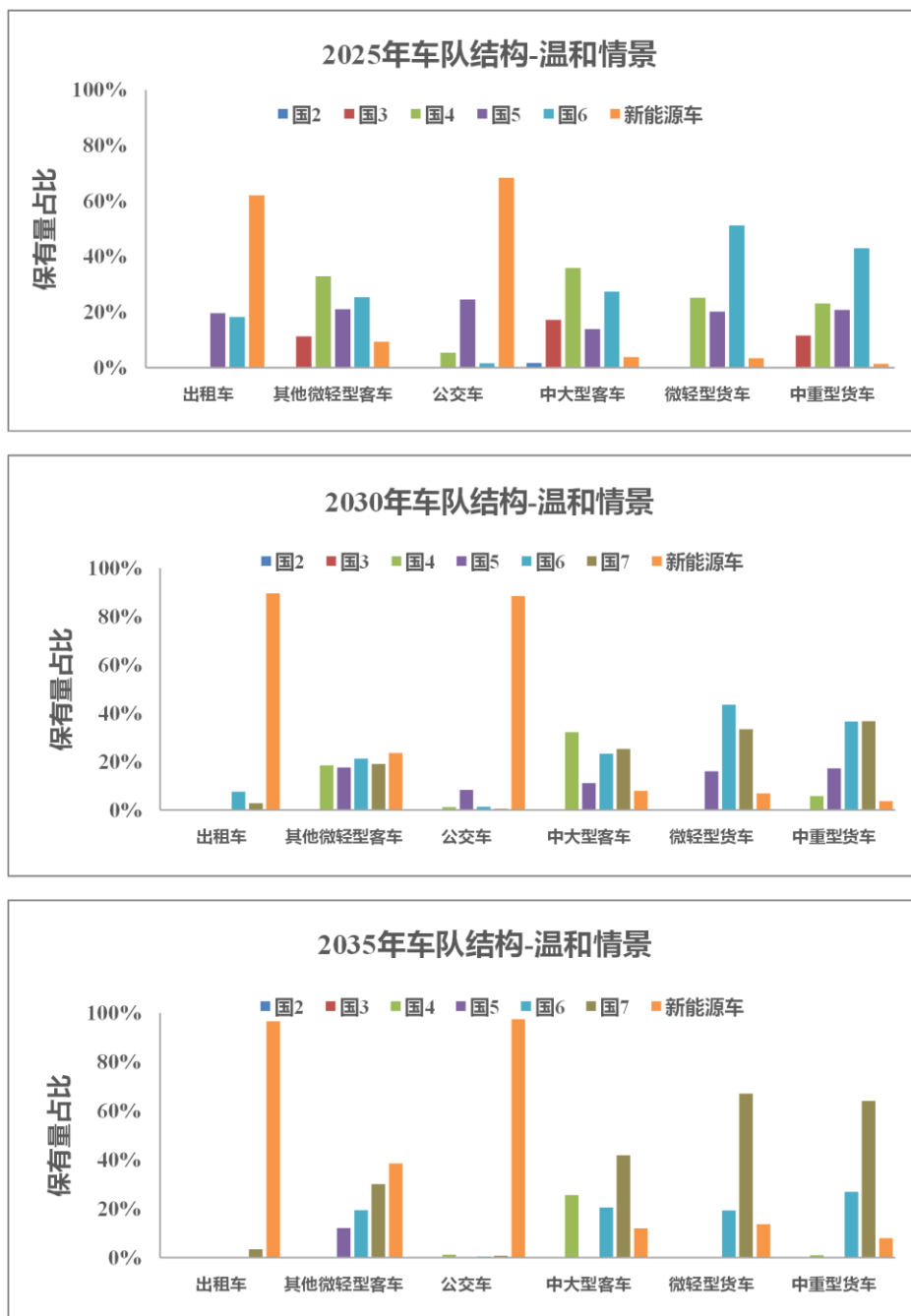


图 4-5 温和情景下未来不同车型车队结构预测

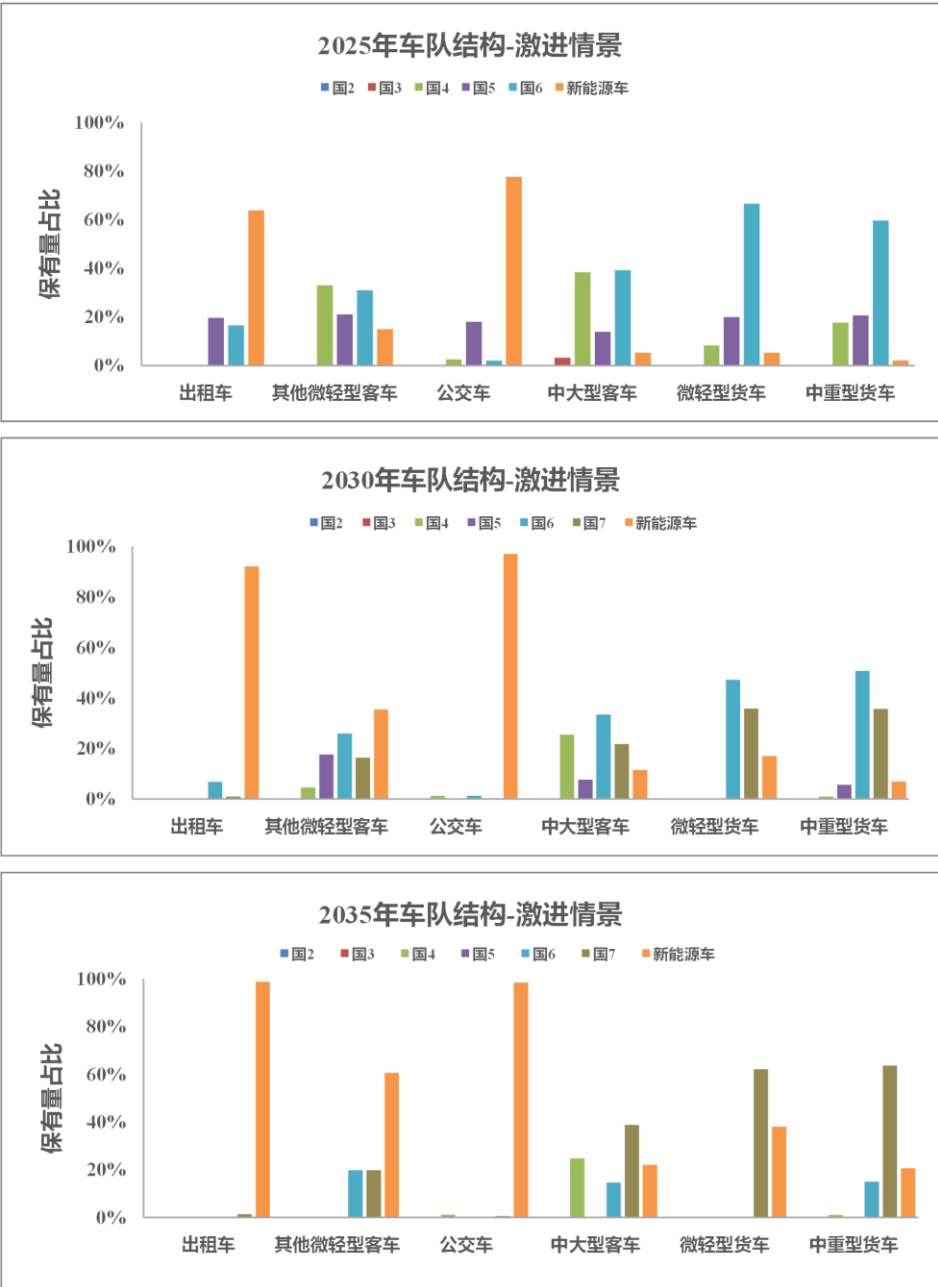


图 4-6 激进情景下未来不同车型车队结构预测

五、中国机动车“减污降碳”路径、空气质量改善及环境健康效益

5.1 不同机动车清洁路径下的碳污减排分析

5.1.1 机动车清洁路径二氧化碳减排分析

(1) 二氧化碳排放量核算

本章节利用 2.3 节中提出的二氧化碳排放量测算方法，测算了全国及各分区

不同机动车清洁路径下的二氧化碳排放量。

从全国来看，在机动车路径温和情景下，与 2020 年相比，2035 年全国机动车 CO₂ 排放量上升 3.4%（2035 年约为 11.4 亿吨）。此外，全国机动车领域 CO₂ 排放量将在 2027 年左右达峰，峰值为 13 亿吨（图 5-1）。在机动车路径激进情景下，与 2020 年相比，2035 年全国机动车 CO₂ 排放量下降 29%（降至 7.7 亿吨）。此外，全国机动车领域 CO₂ 排放量将在 2024 年左右达峰，峰值为 12.18 亿吨（图 5-2）。

从分区域来看，在温和情景下，区域 A 到 2035 年机动车 CO₂ 排放量将会比 2020 年下降 4.4%，而区域 B 和区域 C 分别上升 4.5%和 15.5%。区域 A、区域 B 和区域 C 将分别在 2025 年、2027 年和 2028 年达峰，峰值将分别为 5.46 亿吨、4.32 亿吨和 3.27 亿吨左右（图 5-1）。在激进情景下，区域 A、区域 B 和区域 C 到 2035 年机动车 CO₂ 排放量比 2020 年分别下降 34.7%、25.4%和 15.1%；且将分别在 2024 年、2024 年和 2025 年达峰，峰值将分别为 5.10 亿吨、4.11 亿吨和 2.98 亿吨左右（图 5-2）。整体上，区域 B 和区域 C 的二氧化碳排放量降幅弱于区域 A，这可能与区域 B 和区域 C 机动车保有量增长速度快但清洁措施实施力度没有区域 A 强有关。

从不同车型来看，中重型货车和微轻型客车均是 CO₂ 排放的主要贡献车型。在本研究中，到 2035 年，其他微轻型客车（主要是私家车）和中重型货车对全国 CO₂ 排放量的贡献分别为 39%和 41%（图 5-3）。

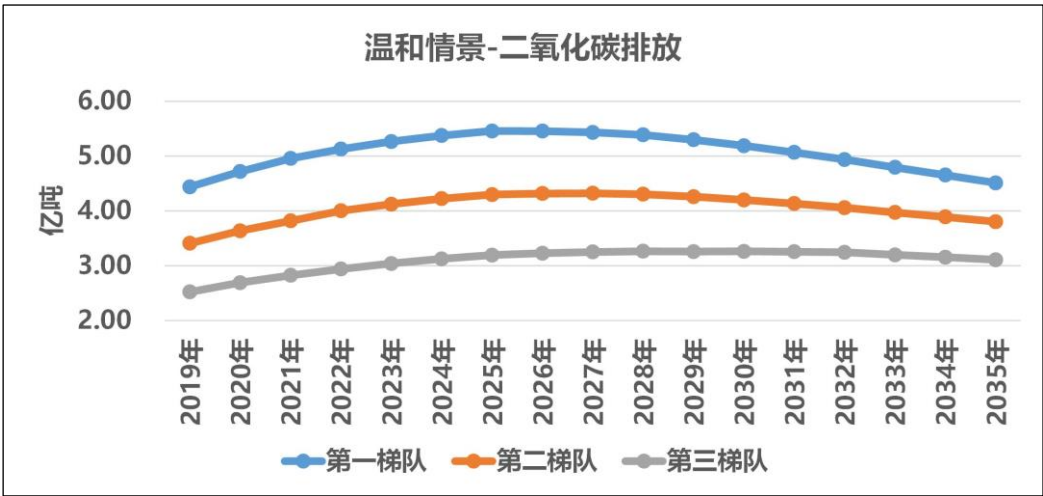


图 5-1 温和情景下 2020-2035 年分梯队二氧化碳排放量变化情况

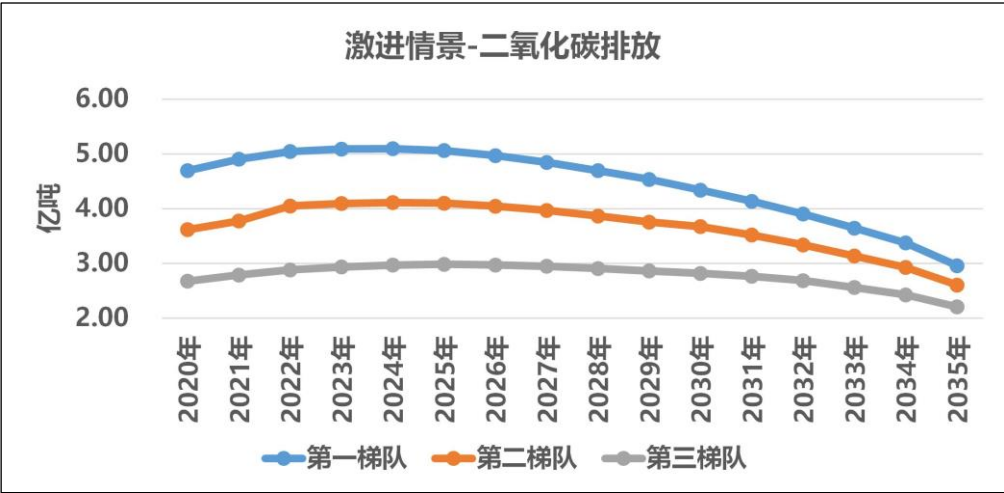


图 5-2 激进情景下 2020-2035 年分梯队二氧化碳排放量变化情况

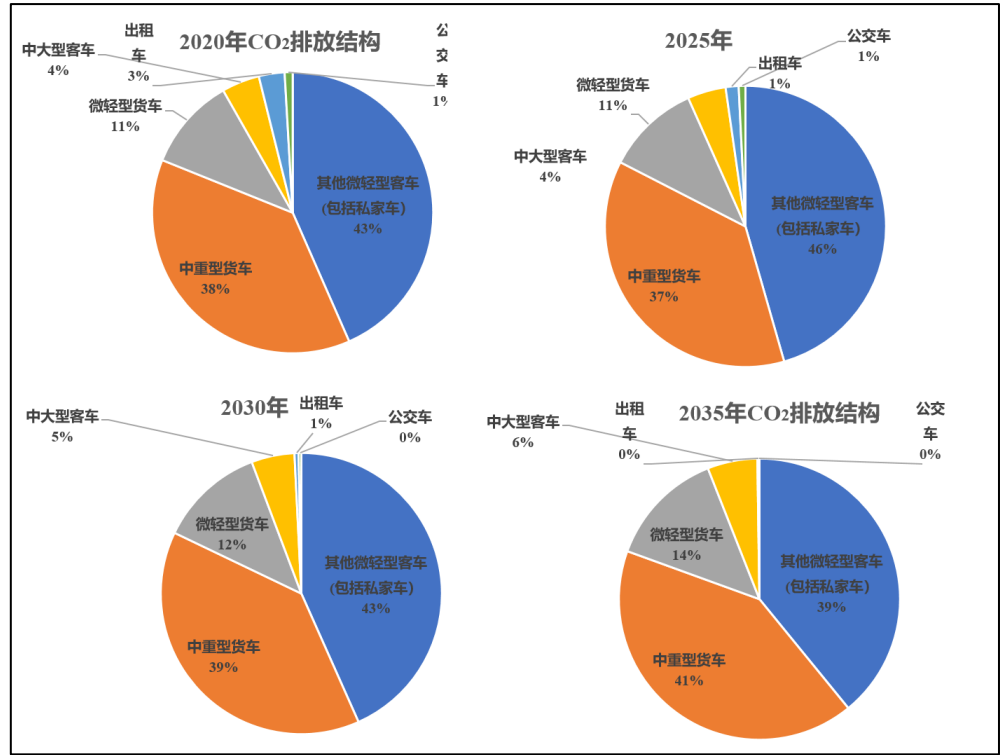


图 5-3 温和情景下 2020-2035 年不同类型机动车的二氧化碳排放变化情况

(2) 二氧化碳排放量变化驱动力分解

① 从全国及不同分区来看，本研究表明如果不采取更严格的机动车清洁措施，即保持现有清洁措施实施力度（基准情况），则随着汽车保有量增加，2035年全国机动车 CO₂ 排放量将会比 2020 年上升 74.2%。如果采取更严格的清洁措施（真实情况），则在温和情景下，2035 年全国机动车 CO₂ 排放量仅比 2020 年上升 3.4%；在激进情景下，2020 年-2035 年全国机动车 CO₂ 排放量则会下降

27.9%。2020-2035 年温和情景下全国机动车 CO₂ 排放量变幅比基准情况低 70.8 个百分点，其中，新能源汽车渗透是主要的贡献驱动力，贡献约 38.5%，燃油经济性提升和公转铁水分别贡献 21.6%和 10.7%（图 5-6）。对于激进情景，2020-2035 年机动车 CO₂ 排放量变幅比基准情况低 98.5 个百分点，其中，新能源汽车渗透、燃油经济性提升和公转铁水分别贡献 51.7%、36.5%和 10.2%（图 5-7）。对于三个不同分区，与全国机动车清洁措施贡献大小排序较为一致，新能源汽车渗透依旧是 CO₂ 减排的主要驱动力，燃油经济性提升次之，公转铁水对 CO₂ 减排的贡献最小。由于我国的污染物排放标准目前没有考虑 CO₂，因此排放标准升级对 CO₂ 减排没有贡献。

② 从不同机动车类型来看，对于微轻型客车（主要为私家车），如果保持现有清洁措施实施力度（基准情况），则到 2035 年全国微轻型客车 CO₂ 排放量将会比 2020 年上升 76%。如果采取更严格的清洁措施（真实情况），则在温和情景与激进情景下，2035 年全国微轻型客车 CO₂ 排放量分别比 2020 年下降 9.1%和 35.9%。2020-2035 年温和情景下全国微轻型客车 CO₂ 排放量变幅比基准情况低 85.7 个百分点，其中，新能源汽车渗透是主要的贡献驱动力，贡献约 54.4%，燃油经济性提升贡献 31.4%。在激进情景下，2020-2035 年微轻型客车 CO₂ 排放量变幅比基准情况低 112 个百分点，其中，新能源汽车渗透是主要的贡献驱动力，贡献约 66.9%，燃油经济性提升贡献 45.3%。对于微轻型客车，由于本研究未考虑客运转铁水，且我国当前排放标准未考虑 CO₂，因此“公转铁水”和排放标准升级对微轻型客车 CO₂ 减排没有贡献（图 5-8）。

对于中重型货车，如果保持现有清洁措施实施力度（基准情况），则到 2035 年全国中重型货车 CO₂ 排放量将会比 2020 年上升 67%。如果采取更严格的清洁措施（真实情况），则在温和情景下，2035 年全国机动车 CO₂ 排放量比 2020 年上升 18%；在激进情景下，下降 16%。与微轻型客车一样，排放标准升级对 CO₂ 减排没有贡献；但由于本研究考虑了货运转铁水，所以“公转铁水”对中重型货车 CO₂ 减排有贡献。此外，受限于行驶里程、充电便捷性等，新能源汽车在对中重型货车新售车中的渗透率远低于微轻型客车。因此，与微轻型客车不同，“公转铁水”对中重型货车 CO₂ 减排的贡献最大，新能源汽车渗透和燃油经济性提升对中重型货车 CO₂ 减排的贡献相当（图 5-8）。

（3）与全国“碳达峰”目标驱动下的机动车减排需求对比分析

在 3.1 节中，以全国“2030 年前达峰”目标为驱动，考虑不同行业间上下游产业链间的耦合关系，提出了“2030 年前达峰”目标驱动下的全国道路交通领域的二氧化碳变化趋势，即 CO₂ 排放需要于 2024 年-2026 年左右达峰，峰值约为 11.6-13.0 亿吨左右（表 5-1 中“宏观目标约束”列的结果）。结合本节中测算的不同机动车清洁路径下（温和、激进情景）全国机动车二氧化碳排放达峰时间和峰值，发现即使不考虑新能源汽车技术，即认为新能源汽车在使用阶段基本为零排放，温和情景仍不能实现 3.1 节中提出的“碳达峰”驱动下的道路交通二氧化碳减排需求；激进情景可实现这一道路交通减排需求（表 5-1）。

表 5-1 全国“碳达峰”驱动下的机动车减排需求对比分析

道路交通	指标	宏观目标约束	温和情景	激进情景
全国	达峰时间	2024-2026 年	2027 年	2024 年
	峰值	11.6-13.0 亿吨	13.00	12.18
区域 A	达峰时间		2025 年	2024 年
	峰值		5.46	5.10
区域 B	达峰时间		2027 年	2024 年
	峰值		4.32	4.11
区域 C	达峰时间		2028 年	2025 年
	峰值		3.27	2.98

5.1.2 机动车清洁路径污染物减排分析

（1）污染物排放量核算

本报告中利用 2.3 节中提出的污染物排放量测算方法，测算了 2020-2035 年全国及各个分区不同机动车清洁路径下不同车型的污染物排放量。

从全国层面来看，2020 年全国机动车（不包括低速汽车和摩托车）氮氧化物（NO_x）、碳氢化合物（HC）、颗粒物（PM）排放量分别为 620、169、6.1 万吨。本研究表明若实施更为严格的机动车清洁措施，则在温和情景下，2035 年全国机动车 NO_x、VOCs 和 PM_{2.5} 排放量将会分别比 2020 年下降 45%、58%和 70%；在激进情景下分别下降 68%、74%和 80%（表 5-2 和表 5-3）。

从分区域来看，对于区域 A，在温和情景下，2035 年机动车 NO_x、VOCs 和 PM_{2.5} 排放量将会分别比 2020 年下降 48%、58%和 70%；激进情景中分别下降 69%、76%和 80%。对于区域 B，在温和情景下，2035 年机动车 NO_x、VOCs 和

PM_{2.5} 排放量将会分别比 2020 年下降 46%、59%和 72%；激进情景中分别下降 69%、74%和 79%。对于区域 C，在温和情景下，2035 年机动车 NO_x、VOCs 和 PM_{2.5} 排放量将会分别比 2020 年下降 42%、58%和 68%；激进情景中分别下降 65%、72%和 78%（表 5-2 和表 5-3）。与 HC 和 PM 相比，2020-2035 年机动车 NO_x 排放量降幅相对较小，NO_x 减排在未来将持续成为完成空气质量目标约束下交通减排的短板。

从不同汽车类型来看，2020-2035 年全国中重型货车对 NO_x 的排放贡献约为 66.65%-73.95%；微轻型客车对 HC 的排放贡献约为 49.99%-66.84%，因此中重型货车将一直是 NO_x 的主要排放源，微轻型客车（汽油）是 HC 主要排放源。

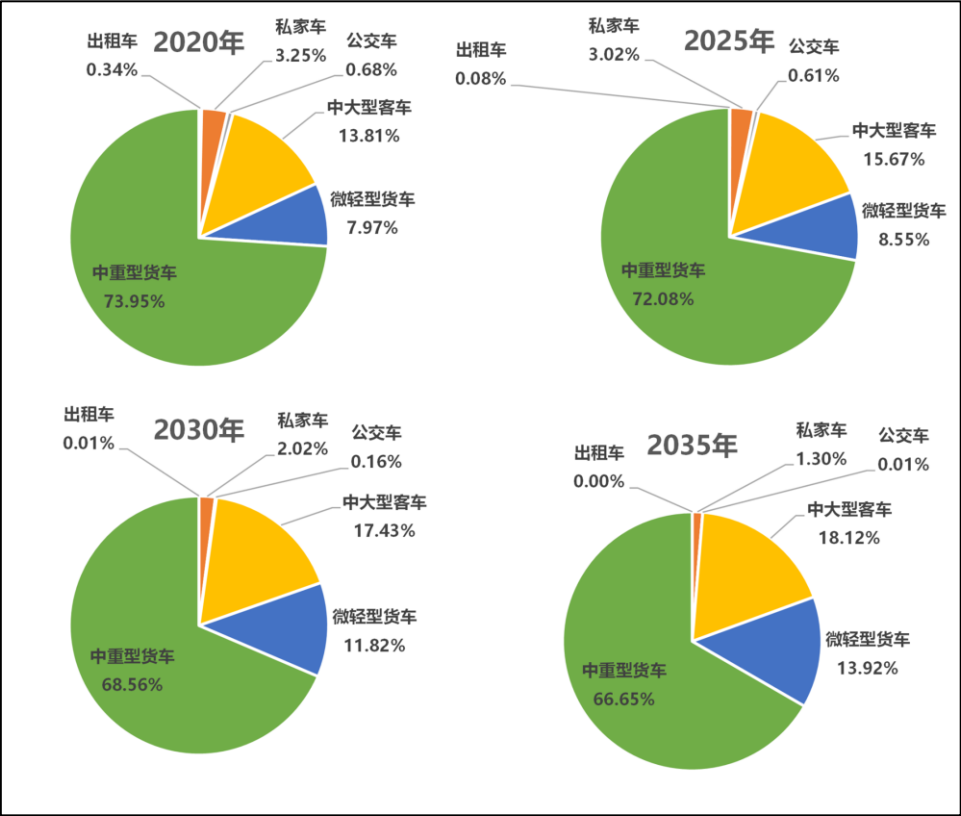


图 5-4 温和情景下 2020-2035 年 NO_x 排放结构

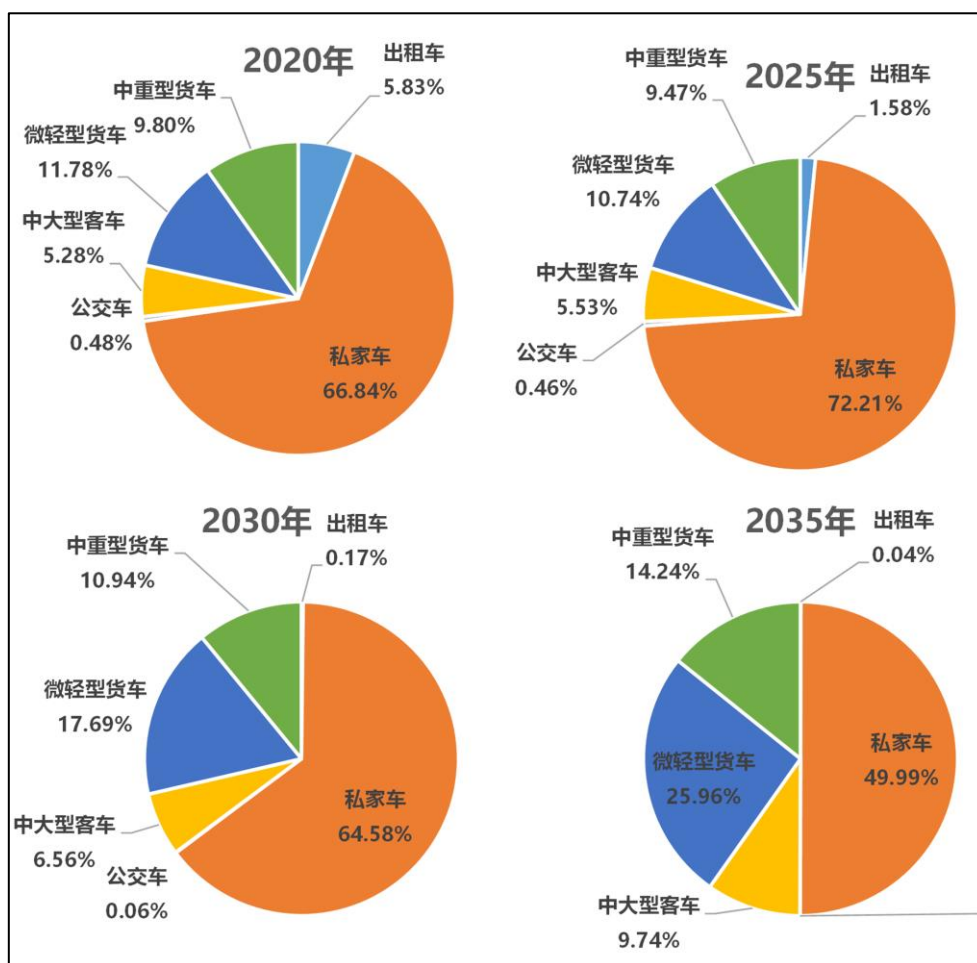


图 5-5 温和情景下 2020-2035 年 HC 排放结构

(2) 污染物排放量变化驱动力分解

① 从全国及不同分区来看，不同措施对污染物减排的贡献大小排序及贡献时间变化趋势大体一致。与二氧化碳不同，排放标准升级是污染物减排的主要驱动力，尤其在温和情景下，排放标准升级的贡献远超其它机动车清洁措施（图 5-6 蓝色线条）；但排放标准的贡献在 2025 年后逐步趋缓。新能源汽车是减排的第二大驱动力，其贡献在 2025 年后逐渐凸显；尤其在激进情景中，到 2035 年，新能源汽车对 NO_x 和 VOCs 减排的贡献基本与排放标准升级持平（图 5-7）。对于 VOCs 减排，油耗下降是第三大贡献因素；但对于 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 减排，“公转铁、公转水”是第三大贡献因素。本研究中“公转铁、公转水”仅考虑对大宗货运的影响，未考虑对客运影响，即“公转铁、公转水”主要分担了中重型货运量。中重型货车是 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放源，因此“公转铁、公转水”对 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$

减排的贡献较大。

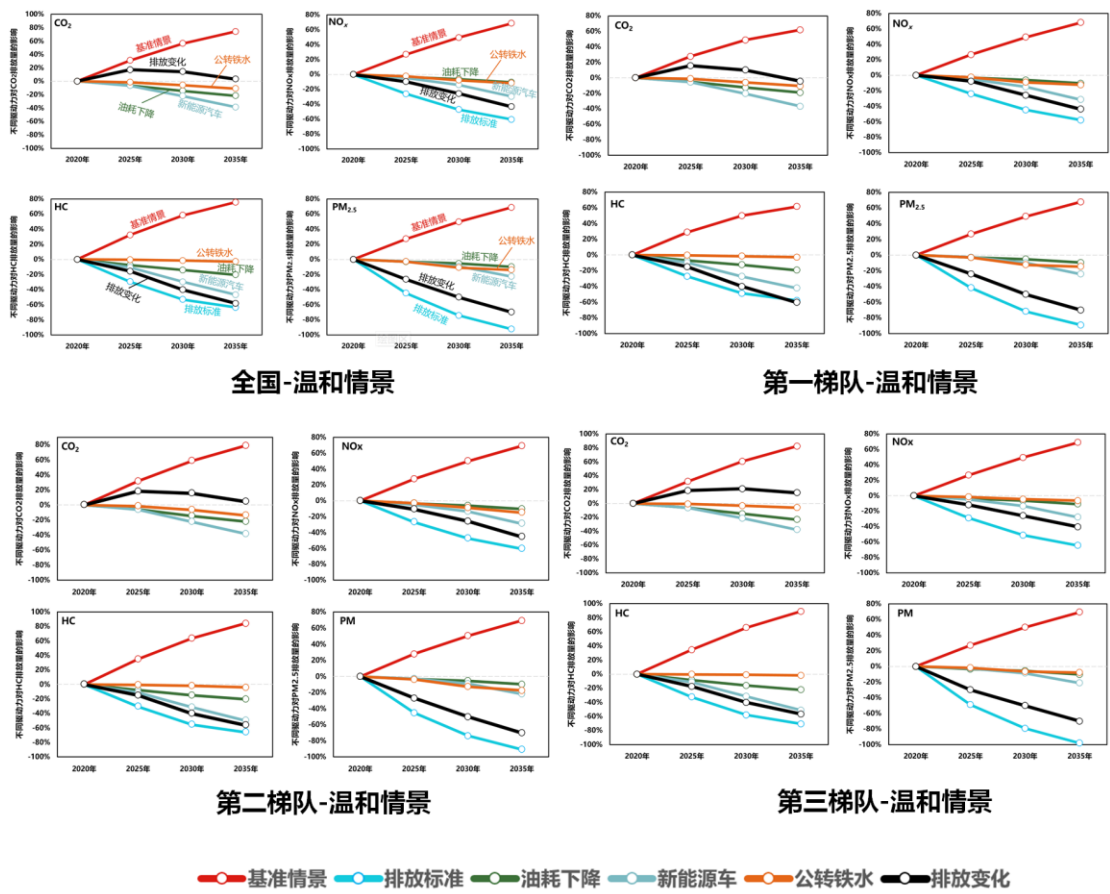


图 5-6 温和情景下不同清洁措施对全国及不同分区机动车污染减排的贡献分解

注：第一梯队、第二梯队和第三梯队分别代表区域 A、区域 B 和区域 C

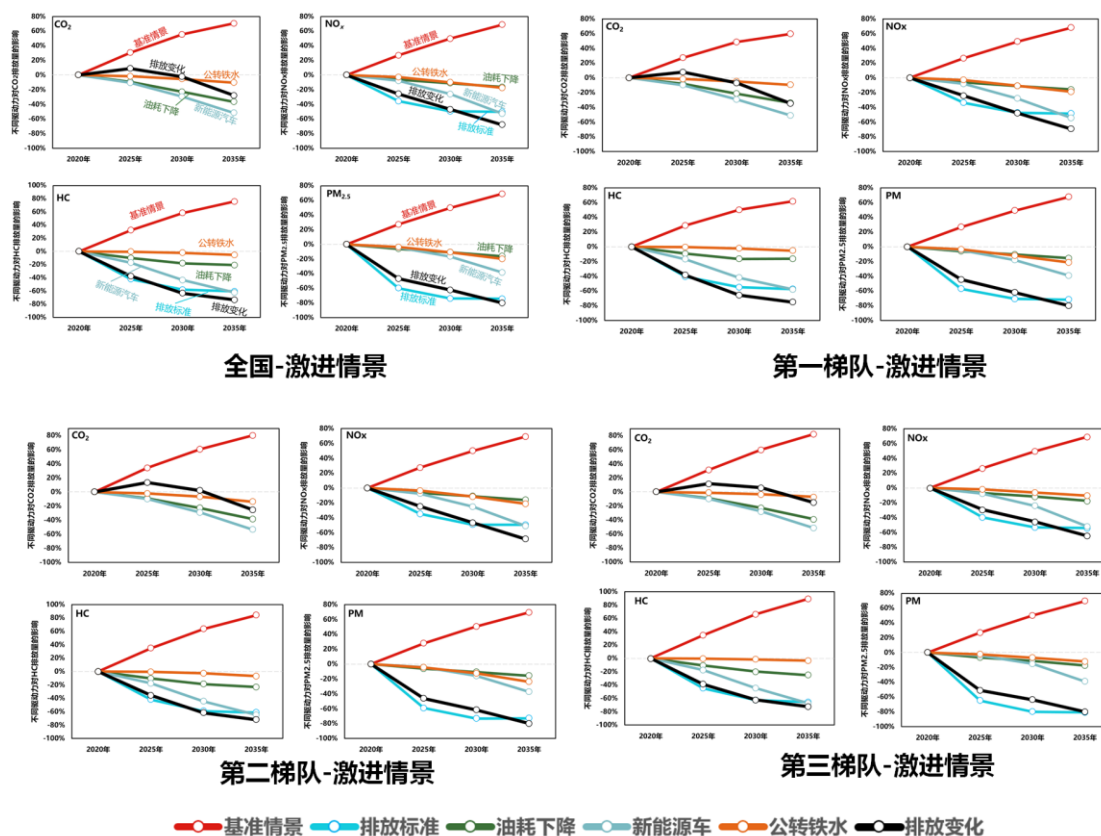


图 5-7 激进情景下不同清洁措施对全国及不同分区机动车污染减排的贡献分解

注：第一梯队、第二梯队和第三梯队分别代表区域 A、区域 B 和区域 C

② 本研究结果表明，对于出租车和公交车，到 2030 年基本实现零排放，其中新能源汽车渗透是 2020 年-2035 年污染物减排的主要驱动力。考虑到 2020-2035 年中重型货车将一直是 NO_x 的主要排放源，微轻型客车（主要为私家车）是 VOCs 主要排放源。因此本小节重点选择中重型货车和微轻型客车这两大重点管控车型，开展机动车清洁措施对两大车型污染减排的贡献分解（图 5-8）。

从不同汽车类型来看，与 CO_2 不同，不论是微轻型客车（主要是私家车）还是中重型货车，在假定各汽车均能按照排放标准达标排放的前提下，排放标准升级是污染物减排的主要驱动力。对于微轻型客车，整体上，清洁措施对各污染物的减排贡献大小顺序为：排放标准升级>新能源汽车渗透>燃油经济性提升。由于本研究没有考虑客运公转铁水，因此“公转铁水”对微轻型客车污染物减排没有贡献。值得注意的是，排放标准升级的贡献潜力逐渐缩窄。而随着新能源汽车在微轻型客车中的渗透率快速上升，到 2035 年，在温和情景下，新能源汽车对 NO_x 和 HC 污染减排的贡献几乎与排放标准相当；在激进情景下，新能源汽车对 NO_x

和 HC 污染减排的贡献已经超过排放标准升级。

对于中重型货车，排放标准升级对污染物减排的贡献最大，新能源汽车的贡献逐渐突出。受限于行驶里程焦虑、充电桩数量、充电便捷性等，新能源汽车在中重型货车中的渗透率到 2035 年一直处于较低的水平，因此新能源汽车对污染物减排的贡献低于排放标准升级。在温和情景下，对污染物减排的贡献排序为：排放升级>公转铁水>新能源汽车>油耗下降。在激进情景下，新能源汽车对污染物减排的贡献在 2030 年超过“公转铁水”的贡献。

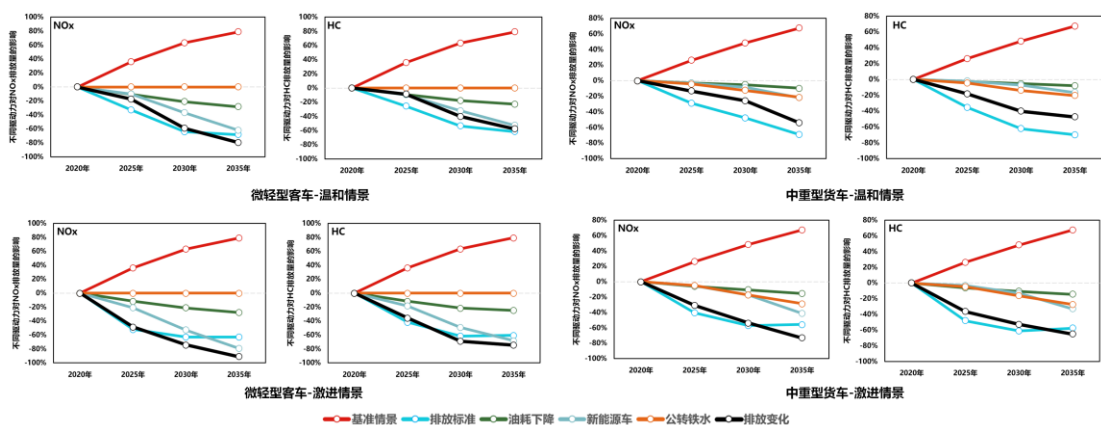


图 5-8 不同清洁措施对微轻型客车和中重型货车污染减排的贡献分解

(3) 与“美丽中国”空气质量改善目标驱动下的机动车减排需求对比分析

在 3.2 节中，本研究耦合排放清单和空气质量模型，定量模拟了以“2035 年 PM_{2.5} 浓度降至 25μg/m³”和“2035 年 PM_{2.5} 浓度降至 15μg/m³”为目标约束的全国及不同分区道路交通的污染物减排需求。

通过对比 2035 年 PM_{2.5} 目标约束下的机动车污染物减排需求（表 5-2 和表 5-3，“自上而下”列对应的结果）与本节研究中测算的全国及不同分区机动车污染物减排量结果（表 5-2 和表 5-3，“自下而上”列对应的结果），发现温和情景和激进情景均可实现“2035 年 PM_{2.5} 为 25μg/m³”目标驱动下的道路交通各污染物减排需求。但是对于“2035 年 PM_{2.5} 为 15μg/m³”目标约束下的道路交通减排需求，温和情景和激进情景均不能实现 NO_x 减排需求，且仅有激进情景能实现道路交通 VOCs 减排需求。

表 5-2 2035 年 PM_{2.5} 浓度为 25μg/m³ 目标驱动下的机动车污染物减排需求对比分析

		自上而下	自下而上	
道路交通	污染物	2020-2035 减排需求	温和情景	激进情景
全国	NO _x	-45%	-45%	-68%

	VOCs	-40%	-58%	-74%
	PM _{2.5}	-30%	-70%	-80%
区域 A	NO _x	-47%	-48%	-69%
	VOCs	-42%	-58%	-76%
	PM _{2.5}	-32%	-70%	-80%
区域 B	NO _x	-45%	-46%	-69%
	VOCs	-40%	-59%	-74%
	PM _{2.5}	-30%	-72%	-79%
区域 C	NO _x	-42%	-42%	-65%
	VOCs	-36%	-58%	-72%
	PM _{2.5}	-28%	-68%	-78%

表 5-3 2035 年 PM_{2.5} 浓度为 15μg/m³ 目标驱动下的机动车污染物减排需求对比分析

道路交通	污染物	自上而下	自下而上	
		2020-2035 减排需求	温和情景	激进情景
全国	NO _x	-80%	-45%	-68%
	VOCs	-72%	-58%	-74%
	PM _{2.5}	-50%	-70%	-80%
区域 A	NO _x	-82%	-48%	-69%
	VOCs	-75%	-58%	-76%
	PM _{2.5}	-51%	-70%	-80%
区域 B	NO _x	-80%	-46%	-69%
	VOCs	-72%	-59%	-74%
	PM _{2.5}	-50%	-72%	-79%
区域 C	NO _x	-78%	-42%	-65%
	VOCs	-68%	-58%	-72%
	PM _{2.5}	-47%	-68%	-78%

5.2 机动车清洁路径的空气质量改善效益

5.2.1 空气质量改善效益及清洁措施贡献分解

本研究耦合排放清单模型和 WRF-CAMx 空气质量模型^[26, 27]定量模拟了 2020-2035 年机动车清洁路径带来的空气质量改善效益。模型具体方法及参数设置介绍见 2.4 节。在模型定量模拟设置中，假设其他行业/领域污染物排放变化保持不变，因此空气质量改善完全取决于机动车清洁化。此外，本研究假设所有汽车均达标排放。结果表明，2020-2035 年，在温和情景下，机动车清洁措施实施后，全国、区域 A、区域 B 和区域 C 的 PM_{2.5} 浓度分别下降 3.0μg/m³、3.4μg/m³、

3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，暖季（5-10 月） O_3 日最大 8 小时浓度均值分别下降 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在激进情景下，机动车清洁措施实施后，2020-2035 年全国、区域 A、区域 B 和区域 C 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别下降 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， O_3 浓度分别下降 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

此外，本研究还分解了不同机动车清洁措施对空气质量改善的贡献。结果表明，不同机动车清洁措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度下降的贡献排序为：排放标准升级>新能源汽车>公转铁水>燃油经济性提升。排放标准升级对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度下降的累积贡献最高，但在 2030 年之后，排放标是升级对空气质量改善的贡献逐渐缩窄。新能源汽车渗透为第二大贡献驱动力，对于新能源汽车来说，受技术水平和基础设施不足的限制，2020-2025 年新能源车渗透的贡献相对有限（图 5-9 和图 5-10）；但随着规模经济的形成和基础设施的完善，新能源汽车的贡献明显突出。一次 $\text{PM}_{2.5}$ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分， NO_x 和 VOCs 分别是硝酸盐和二次气溶胶（SOA）生成的前体物，且硝酸盐在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比大于 SOA。根据 5.1.2 节结果，燃油经济性提升对 VOCs 减排的贡献大于公转铁水；公转铁水对机动车一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x 减排的贡献大于燃油经济性提升。因此总体上公转铁水对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献>燃油经济性提升。对于 O_3 ，从全国大范围来看， O_3 生成机制更偏向于 NO_x 控制，因此公转铁水对 O_3 浓度下降的贡献也大于燃油经济性提升。

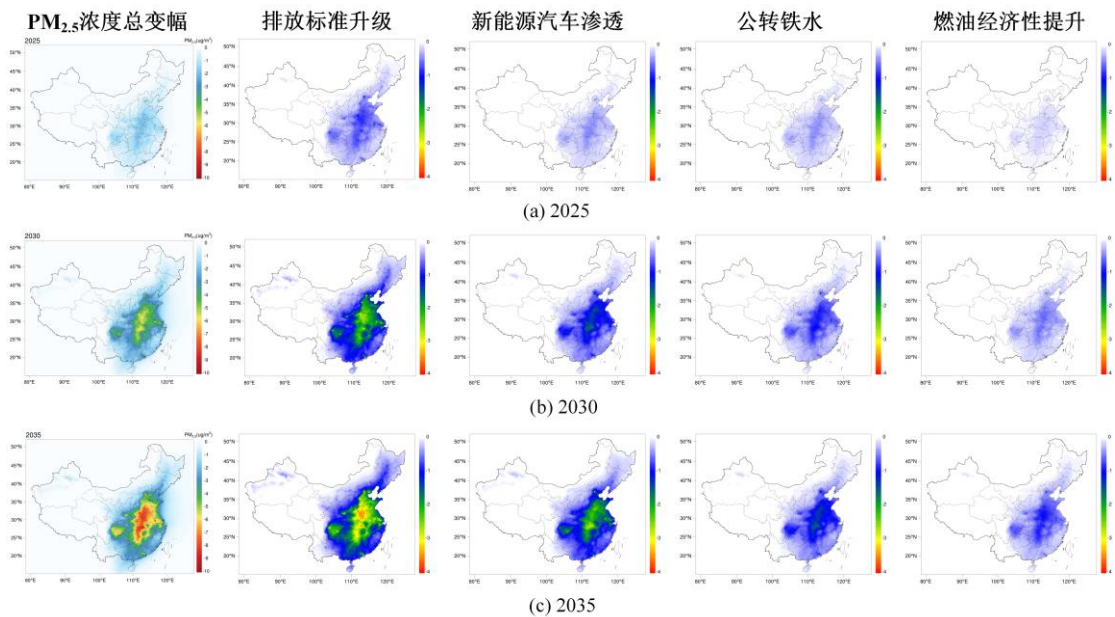


图 5-9 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化及不同机动车清洁措施的贡献分解

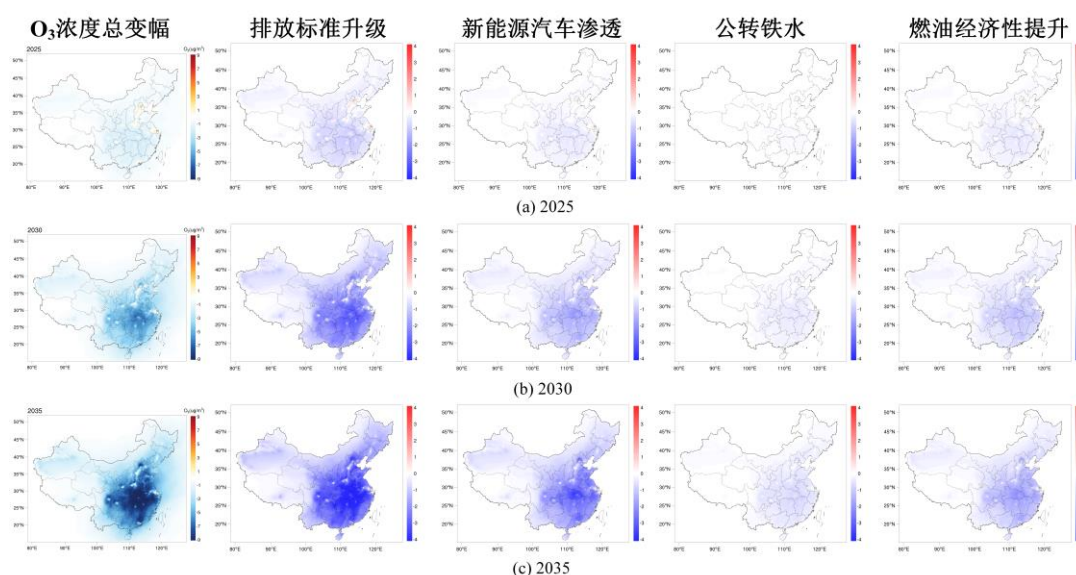


图 5-10 O₃ 浓度变化（5-10 月 MDA8 均值）及不同机动车清洁措施的贡献分解

5.2.2 对“美丽中国 2035”空气质量改善目标的贡献

本研究在 3.2.1 节中以“2035 年美丽中国”空气质量改善目标为导向，提出了到 2035 年 PM_{2.5} 浓度降至世界卫生组织第二阶段 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和第三阶段 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 两个目标。

如果要实现到 2035 年全国 PM_{2.5} 浓度降至 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的目标，(1)则全国 PM_{2.5} 浓度需要在 2020 年（33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的基础上下降 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 需求侧结果）。在温和情景下，机动车清洁化可使得全国 2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度下降 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 供给侧结果），对全国 25 目标的贡献为 38%。(2) 则各分区 PM_{2.5} 浓度需要在自身 2020 年的基础上下降 5-9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 需求侧结果）。在温和情景下，机动车清洁化可使得各分区 2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度下降 2.0-3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 供给侧结果），对各分区实现自身相应 PM_{2.5} 改善目标的贡献为 33-43%。

如果要实现到 2035 年全国 PM_{2.5} 浓度降至 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的目标，(1)则全国 PM_{2.5} 浓度需要在 2020 年（33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的基础上下降 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 需求侧结果）。在激进情景下，机动车清洁化可使得全国 2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度下降 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 供给侧结果），对全国 15 目标的贡献为 24%。(2) 则各分区 PM_{2.5} 浓度需要在自身 2020 年的基础上下降 14-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 需求侧结果）。在激进情景下，机动车清洁化可使得各分区 2020-2035 年 PM_{2.5} 浓度下降 3.0-4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 5-4 供给侧结果），对分梯队实现自身相应 PM_{2.5} 改善目标的贡献为 21-27%。

表 5-4 机动车清洁化对“美丽中国 2035”空气质量目标的贡献

单位（微克/立方米）	需求侧		供给侧	
2020-2035 PM _{2.5} 降幅	美丽中国 25 目标	美丽中国 15 目标	温和情景	激进情景
全国	-8	-18	-3.0	-4.3
区域 A	-7	-17	-3.4	-4.6
区域 B	-9	-20	-3.3	-4.6
区域 C	-5	-14	-2.0	-3.0

5.3 机动车清洁路径的环境健康效益

5.3.1 全国层面环境健康效益改善情况

一般情况下道路交通附近人口密集，且机动车污染物排放与人口密度高度一致，因此机动车排放预计会对人体健康产生明显不利影响。为探讨机动车污染排放对人体健康的影响，并探讨机动车清洁化带来的环境健康效益，本研究利用 GEMM 模型和 IER 模型分别计算了机动车清洁路径下 PM_{2.5} 和 O₃ 长期暴露改善带来的环境健康效益，具体方法介绍参见 2.5 节。

本项目结果表明，2020 年全国 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露相关的过早死亡人数为 124 万人，大力推进机动车清洁化进程可产生显著的环境健康收益。（1）在机动车清洁化温和情景下，与 2020 年过早死亡人数相比，到 2035 年全国可避免约 13 万人过早死于 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露，占 2020 年全国 PM_{2.5} 和 O₃ 总暴露相关过早死亡人数的 11%。其中，到 2035 年可分别避免约 9.15 万和 3.89 万人过早死于大气 PM_{2.5} 污染暴露和 O₃ 污染暴露。（2）在机动车清洁路径激进情景下，与 2020 年过早死亡人数相比，到 2035 年全国总避免 17 万人过早死于 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露，占 2020 年全国 PM_{2.5} 和 O₃ 总暴露相关过早死亡人数的 14%。其中，到 2035 年可分别避免约 12.26 万和 4.96 万人过早死于大气 PM_{2.5} 污染暴露和 O₃ 污染暴露。

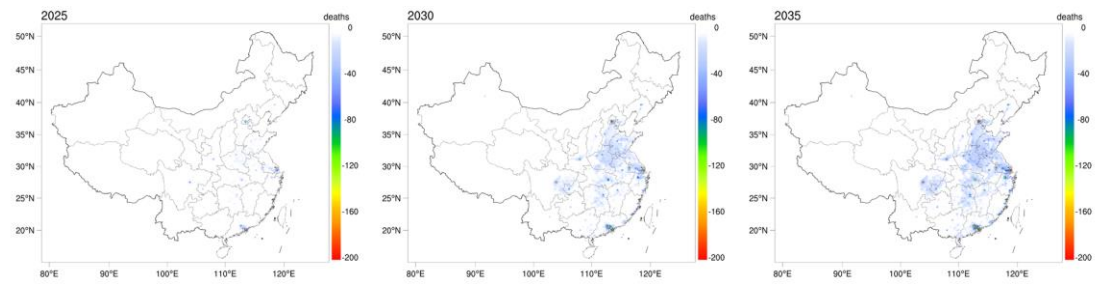


图 5-11 2020-2035 年避免 PM_{2.5} 暴露相关死亡人数

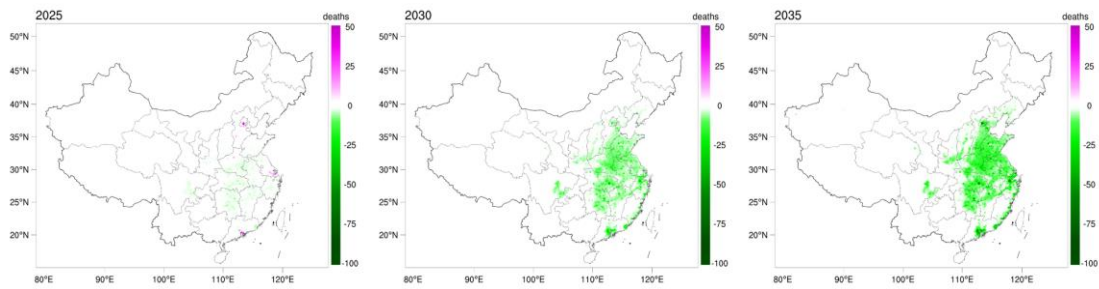


图 5-12 2020-2035 年避免 O₃ 暴露相关死亡人数

5.3.2 区域层面环境健康效益改善情况

不同分区人口密集度差别较大，且机动车清洁政策带来的空气质量改善效果不同，因此机动车清洁化带来的环境健康效益预计存在明显区域差异。为定量比较不同分区的环境健康效益，针对三个分区，本节计算了各分区每十万避免死亡人数。研究表明，在机动车清洁化温和情景下，相比于 2020 年，（1）到 2035 年，区域 A、区域 B 和区域 C 可分别避免 8 人/每十万、7 人/每十万和 4 人/每十万 PM_{2.5} 暴露相关过早死亡；（2）区域 A、区域 B 和区域 C 可分别避免 3 人/每十万、3 人/每十万和 1 人/每十万 O₃ 暴露相关过早死亡。在激进情景下，相比于 2020 年，（1）到 2035 年，区域 A、区域 B 和区域 C 可分别避免 10 人/每十万、9 人/每十万和 5 人/每十万 PM_{2.5} 暴露相关过早死亡；（2）区域 A、区域 B 和区域 C 可分别避免 4 人/每十万、4 人/每十万和 1 人/每十万 O₃ 暴露相关过早死亡。

整体上，区域 C 可实现的每十万人避免 PM_{2.5} 暴露相关过早死亡人数最少，区域 A 最多，与区域 C 机动车清洁政策较弱有关。但与 PM_{2.5} 改善相关环境健康效益不同，与 2020 年相比，到 2035 年区域 B 每十万人可避免的 O₃ 暴露过早死亡人数降幅大于区域 A，可能因为区域 A 很多城市较为发达，O₃ 生成偏向于 VOCs 控制区。而本研究中机动车清洁化带来的 NO_x 减排量大于 VOCs 减排量（减排结果参见 5.1.2 节）。因此，短期内 NO_x 减排反而会带来区域 A 中部分网格 O₃ 浓度上升进而增加 O₃ 暴露相关过早死亡人数。

六、政策建议

（1）面向“美丽中国”和“双碳战略”明确减污与降碳协同目标。在本研究中，“2035 年 PM_{2.5} 实现 15μg/m³”目标驱动下机动车减排需求>激进情景可实现的减排量>全国碳达峰目标驱动下机动车减排需求>温和情景可实现的减排量>“2035 年 PM_{2.5} 实现 25μg/m³”目标驱动下机动车减排需求。总体看，全国“碳

达峰”目标对道路交通清洁化的驱动力比“2035年PM_{2.5}实现25μg/m³”目标的驱动力强，空气质量改善目标与全国碳达峰目标在约束强度上不匹配。建议制定与全国碳达峰目标相匹配的空气质量改善目标，在减污降碳政策共同作用下，有望到2035年将全国PM_{2.5}年均浓度降至20μg/m³，并以此明确阶段性空气质量改善目标。同时推进能源双控向碳双控转变，明确不同阶段的碳排放总量控制目标。

(2) 推动机动车零排放是实现“美丽中国”空气质量改善目标、保护人群健康及提升最普惠的民生福祉的关键。从空气质量改善效果来看，若要实现2035年全国PM_{2.5}浓度降至25μg/m³的目标，全国PM_{2.5}浓度需要在2020年(33μg/m³)的基础上下降8μg/m³。本研究结果表明，到2035年，机动车清洁化温和情景和激进情景可分别使得全国PM_{2.5}浓度分别下降3.0μg/m³和4.3μg/m³，对实现“全国25μg/m³目标”的贡献分别为38%和54%；其中，对区域A（经济水平较为发达）实现对应PM_{2.5}浓度下降目标的贡献高达43%和66%。从环境健康效益来看，到2035年，机动车清洁化温和情景和激进情景下，全国可避免约13万和17万人过早死于PM_{2.5}和O₃暴露，分别占2020年全国PM_{2.5}和O₃暴露相关过早死亡人数的11%和14%。

(3) 微轻型客车和货运领域用车尤其是中重型货车是实现机动车领域减污降碳协同的重点。本项目研究结果表明，2020-2035年，中重型货车和微轻型客车对机动车CO₂排放的贡献分别为37%-41%和39%-47%；中重型货车对机动车NO_x排放的贡献为67%-74%；微轻型客车对机动车HC排放的贡献为50%-74%。因此，即使从中长期来看，微轻型客车和中重型货车依旧是机动车CO₂和大气污染物排放的重点车型。

(4) 积极推动道路交通全面电动化是实现机动车零排放的关键。当前中国机动车尾气排放标准已经从“国一”升级到“国六”，污染物排放因子理论值大幅下降。本研究表明从2020年到2035年，除出租和公交车外，排放标准对其它车型的累积贡献最大，然而其贡献潜力逐年缩窄；且监管机动车实际行驶排放的成本较高。但对于新能源汽车，尽管短期内对污染物减排的贡献不显著；但随着技术提升及成本下降，新能源汽车的贡献从2025年开始显著升高，成为中长期碳污减排的关键驱动力。但需注意如果插电混动销售占比持续提高，一定程度上

会给机动车零排放带来挑战。因此建议积极推动道路交通全面电动化，鼓励使用纯电动车或氢能汽车；对于插电混动汽车，给予一定的过渡窗口期，并严格监管插电混动汽车实际道路行驶排放。力争在全国层面，尽快实现出租车、城市公交车新车全面电动化；对于私家车，争取到 2025 年、2030 年和 2035 年新能源渗透率达到 45%、65%和 95%；对于微轻型货车和中重型货车，力争到 2035 年新能源渗透率分别达到 50%和 40%。

(5) 研究制定机动车二氧化碳协同管控排放标准。2020-2035 年排放标准对于常规大气污染物减排的累积贡献最大，但由于我国机动车排放标准中没有考虑二氧化碳，因此排放标准对二氧化碳减排没有贡献。为更有效控制机动车二氧化碳排放，建议尽快启动机动车排放标准制修订工作，将二氧化碳排放纳入下一阶段机动车排放标准体系，建立统一的机动车二氧化碳和大气污染物监测监管机制，实现机动车减污降碳协同增效。

(6) 加强交通站监测网络建设，推动交通站数据定期公布。交通站属于污染源类监测站点，周边一般人口聚集较多，且道路交通污染物排放高度与人体高度接近，因此交通源排放会对人群健康产生不利影响。交通站数据缺乏是目前尚不能准确评估道路交通管控影响及对人群健康影响的重要因素。建议参考城市降尘管控方式，制定标准化规则，将交通站数据定期进行公布并排名，助力交通源类监管，推动道路交通零排放进程。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报（2021）[R]. 2021.
- [2] 北京市人民政府. 北京市 2020 年 PM_{2.5} 源解析结果 .
https://www.beijing.gov.cn/gongkai/shuju/sjjd/202109/t20210907_2485970.html.
- [3] 朱彤, 万薇, 刘俊等. 世界卫生组织《全球空气质量指南》修订解读. 科学通报. 2022, 67 (8): 697-706.
- [4] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 住房和城乡建设部, 交通运输部, 农业农村部, 国家能源局. 减污降碳协同增效实施方案. 2022.
https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html.
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）的通知 . https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 推国务院办公厅关于印发推进运输结构调整三年行

动计划（2018—2020年）的通知. https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/09/content_5328817.htm.

- [7] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于印发推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案（2021—2025年）的通知. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5666914.htm.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 关于实施汽车国六排放标准有关事宜的公告. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202305/t20230509_1029448.html.
- [9] 俞嘉馨, 柴昱名, 荣婉婧等. 基于 GM(1,1)模型的沈阳市机动车保有量测算. 时代汽车. 2021.
- [10] 赵萌, 夏秀芳. 山东省私有汽车保有量的影响因素分析. 中国市场. 2014, (31): 151-152.
- [11] 马艳丽, 高月娥. 我国未来汽车保有量情景预测研究. 公路交通科技. 2007, (1): 121-125.
- [12] 张亭; 薛伟莲. 基于 BP 神经网络的机动车保有量预警模型研究. 中国管理信息化. 2014, 17.
- [13] 王澎. 基于熵权法的灰色广义模糊神经网络的机动车保有量预测模型. 汽车工程学报. 2010, (5): 91-94.
- [14] 吴潇萌. 中国道路机动车空气污染物与 CO₂ 排放协同控制策略研究. 2016.
- [15] 李捷, 刘森. 基于 Gompertz 模型变换的中国乘用车保有量预测. 汽车与配件. 2018, (35): 2.
- [16] 郑博. 高分辨率人为源排放清单技术方法与评估研究. 清华大学, 2016.
- [17] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高. 中国乘用车与商用车保有量预测. 清华大学学报(自然科学版). 2011, 51(6):868-872.
- [18] Dargay J, Gatley D, Sommer M. Vehicle ownership and income growth, worldwide:1960-2030. The Energy Journal. 2007, 28(4):143-170
- [19] Kobos P H, Erickson J D, Drennen T E. Scenario analysis of Chinese passenger vehicle growth. Contemporary Economic Policy. 2003, 21(2): 200-217.
- [20] Huo H, Wang M, Johnson L, et al. Projection of Chinese motor vehicle growth, oil demand, and CO₂ emissions through 2050. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2006, 2038(1): 69-77
- [21] Huo H, Zhang Q, He K, et al. Vehicle-use intensity in China:current status and future trend. Energy Policy. 2012,43(3): 6-16
- [22] Zhang H, Chen W, Huang W. TIMES modelling of transport sector in China and USA: comparisons from a decarbonization perspective. Applied Energy. 2016,162 (6):1505-1514.
- [23] IEA. The future of trucks: implications for energy and the environment[EB/OL]. 2017[2018-05-18].

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf>.

- [24] 北京市地方标准. DB11/T 1786-2020. 《二氧化碳排放核算和报告要求-道路运输业》.
- [25] 清华大学和中国环境监测总站. 《城市大气污染源排放清单编制技术手册》. 2018.
- [26] Shi X R, Lei Y, Xue W B, et al. Drivers in carbon dioxide, air pollutants emissions and health benefits of China's clean vehicle fleet 2019–2035. *Journal of Cleaner Production*. 2023, 391, 136167.
- [27] Xue WB, Shi XR, Yan G, et al. Impacts of meteorology and emission variations on the heavy air pollution episode in North China around the 2020 Spring Festival. *Sci China Earth Sci*. 2021, 64(2): 329–339.
- [28] Li M, Liu H, Geng G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review, *Natl. Sci. Rev*. 2017, 4, 834-866.
- [29] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, *Atmos. Chem. Phys*. 2018. 18, 14095-14111.
- [30] Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos Chem and Phys*. 2006. 6(11): 3181–3210.
- [31] Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc Natl Acad Sci U.S.A*. 2018. 38(115): 9592–9597.
- [32] Xu X L. 2017. Grid dataset of China's population spatial distribution. Resource and Environment Science and Data Center. DOI:10.12078/2017121101. <https://www.resdc.cn/AchievementList1.aspx>.
- [33] Burnett R T, Pope C A, Ezzati M, et al. An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure. *Environ Health Perspect*. 2014, 122(4):397–403.
- [34] Jiang X J, Hong C P, Zheng Y X, et al. To what extent can China's near-term air pollution control policy protect air quality and human health? A case study of the Pearl River Delta region. *Environ. Res. Lett*. 2015, 10(10):104006.
- [35] 严刚, 郑逸璇, 王雪松等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究. *环境科学研究*. 2022, 35(02): 309-319.
- [36] 蔡博峰, 吕晨, 董金池等. 重点行业/领域碳达峰路径研究方法. *环境科学研究*. 2022, 35(02): 320-328.
- [37] 蔡博峰, 曹丽斌, 雷宇等. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径. *中国人口·资源与环境*. 2021, 31(1): 7-14.
- [38] 王金南, 薛文博, 许艳玲, 雷宇, 丁贞玉. 大气多污染物环境容量三维迭代计算方法. 发明专利. 专利号: ZL201610890597.0

- [39] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 (2022) [R].2022.
- [40] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 数据概览: 2022 年人口相关数据.
https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fgzy/jjsjgl/202301/t20230131_1348088_ext.html.
- [41] United Nations. World Population Prospects 2022:
<https://population.un.org/wpp/>.
- [42] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 . https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [43] Luna Sun, Chongzhi Zhong, Jianfei Peng, et al. Refueling emission of volatile organic compounds from China 6 gasoline vehicles. Science of the Total Environment. 2021, 789, 147883.
- [44] 中华人民共和国工业和信息化部. 《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》. 2020.
https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/sjdt/art/2020/art_45069e679ed2437dba3d13833cefc02e.html.
- [45] 中国统计年鉴. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexch.htm>.
- [46] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2022. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划 .
https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325_1320208.html.
- [47] 中国汽车技术研究中心有限公司. 2021. 中国汽车低碳行动计划研究报告一向全生命周期净零排放迈进.